

**DETECTOR DE CARGA ELÉCTRICA DE ALTA  
SENSIBILIDAD PARA MUESTRAS  
TRIBOELÉCTRICAS DE NANOMATERIALES**

**EASMTN  
PROYECTO**

Versión 2.1

**INFORMACIÓN DEL PROYECTO**

Autores	
Nombre Completo del integrante 1	Federico Leonardo Alderisi
Legajo	42749
e-mail	federicoalderisi@gmail.com

Tutor	Dr. Ing. Javier Gitto
Director	Dr. Ing. Javier Gitto
Año Académico	2023
Responsable de la cátedra	Esp. Ing. Antonio Álvarez

Empresa / Organización / Laboratorio	LEMD (Laboratorio de Electroestática y Materiales Dieléctricos) – CeReCoN – UTN FRM
Patrocinador (Sponsor)	LEMD - PID: CCUTNME0007754



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1	EXECUTIVE RESUME	4
1.2	RESUMEN EJECUTIVO	4
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>4</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVO PARTICULAR	6
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO (CASO DE NEGOCIO)</b>	<b>6</b>
3.1	ANTECEDENTES DEL PROYECTO	6
3.2	ESTADO ACTUAL	9
3.3	NECESIDAD DEL NEGOCIO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	9
3.4	IDEA DEL PROYECTO	9
3.5	BENEFICIOS DEL PROYECTO	10
<b>4</b>	<b>ALCANCE</b>	<b>10</b>
4.1	ALCANCE	10
4.2	LÍMITES O FUERA DE ALCANCE	11
4.3	REQUISITOS DE ALTO NIVEL	11
4.4	SOLUCIONES Y ENTREGABLES PRINCIPALES	11
<b>5</b>	<b>PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>11</b>
5.1	CRONOGRAMA	13
5.2	HITOS	14
<b>6</b>	<b>DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>14</b>
6.1	DESARROLLO TÉCNICO	14
6.1.1	<i>Introducción</i>	14
6.1.2	<i>Electrómetro – Detector de Carga</i>	15
6.1.3	<i>Elección de los elementos activos</i>	15
6.1.4	<i>Fundamentos del diseño</i>	16
6.1.5	<i>Diseño del Sistema</i>	16
6.1.5.1	Detector de Carga y Guarda	16
6.1.5.2	Capacitancias y Capacitancia de Entrada	18
6.1.5.3	Placa “LMP7721 Multi-Function Evaluation Board Users' Guide”	19
6.1.5.4	Consideraciones del Diseño	21
6.1.5.5	Sistema de Reset	22
6.1.5.6	Circuito Detector	23
6.1.5.7	Fuente de Alimentación	28
6.1.5.8	Gabinete	30
6.1.5.9	Periféricos	32
6.1.6	<i>Métodos de Medición de Capacitancia de Entrada del Detector</i>	35
6.1.6.1	1er Método: Medición de Capacitancia de Entrada con RS Serie de Prueba	35
6.1.6.2	2do Método: Medición de Capacitancia de Entrada con CT de Prueba	37
6.1.7	<i>Contrastación y Calibración</i>	38
6.1.7.1	Instrumentación	38
6.1.7.2	Medición de Capacitancia y Resistencia de Materiales	44
6.1.7.3	Medición de Capacitancia de Entrada del Sistema	47
6.1.7.4	Prueba de Linealidad de la Tensión	50
6.1.7.5	Validación del Método – Contrastación y Calibración del Detector	59



6.1.8	<i>Conclusiones Técnicas</i>	68
6.2	FACTIBILIDAD ECONÓMICA	69
6.3	APROXIMACIÓN AL VALOR ACTUAL NETO	73
6.4	TASA INTERNA DE RETORNO	75
6.5	PAYBACK O PLAZO DE RECUPERACIÓN	76
6.6	PRODUCTOS Y SERVICIOS DE OTROS FABRICANTES	76



## **1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 EXECUTIVE RESUME**

This project is focused on the development of a high sensitivity detector to obtain triboelectric values of physical and biological samples. This work is part of the project CCUTNME0007754 "High Sensitivity Triboelectric Measurements" of the LEMD Laboratory.

The implementation of the project was carried out in two parts, the first one in the same LEMD laboratory, where the development of the detector system and the complementary system was carried out, and the second part in the facilities of the laboratory of the German university "Technische Universität Ilmenau", where the contrast and calibration of this was carried out. This was executed during the years 2021/2022.

### **1.2 RESUMEN EJECUTIVO**

Este proyecto se centra en el desarrollo de un detector de alta sensibilidad, para obtener valores triboeléctricos de muestras físicas y biológicas. Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto CCUTNME0007754 "Mediciones Triboeléctricas de Alta Sensibilidad" del Laboratorio LEMD.

El desarrollo del proyecto se realizó en dos partes, la primera en el mismo laboratorio LEMD, donde se realizó el desarrollo del sistema del detector y el sistema complementario, y la segunda parte en las instalaciones del laboratorio de la universidad alemana "Technische Universität Ilmenau", donde se realizó la contrastación y la calibración de este. Esto se realizó durante los años 2021/2022.

## **2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

Este proyecto final surge a partir del PID del laboratorio LEMD a cargo del Ing. Javier Gitto, código del proyecto CCUTNME0007754, en el cuál participo activamente y me permitió obtener una beca de intercambio en Alemania. El desarrollo del proyecto se realizó en dos partes, la primera en el mismo laboratorio LEMD, donde se realizó el desarrollo del sistema del detector y el sistema complementario, y la segunda parte en las instalaciones del laboratorio de la universidad alemana, donde se realizó la contrastación y la calibración de este. Esto se realizó durante los años 2021/2022. Además de entregar el detector, se entrega el procedimiento y valores obtenidos durante las pruebas realizadas en el laboratorio de la universidad alemana, para poder repetirlo en futuros modelos de detectores.

La importancia del desarrollo de un detector de carga eléctrica de alta sensibilidad radica en la posibilidad de realizar mediciones de la carga eléctrica de



nanomateriales y muestras biológicas en las instalaciones del laboratorio LEMD. Esto permite el desarrollo del PID-7754, el cual se centra en el estudio de la alúmina nanoestructurada, y sus efectos insecticidas. El desarrollo de este nanoinsecticida impactará fuertemente en el desarrollo de productos agrícolas, la producción de alimentos y el manejo de plagas; acompañado también de las propiedades ideales, como la baja reactividad química (baja toxicidad para plantas, humanos y animales), posible reutilización y otros usos.

Para el estudio de este nanomaterial, se requiere de un equipo electrómetro, el cual esta consta de un alto costo y actualmente de difícil adquisición. A causa de esto, se decide construir un detector de carga eléctrica, que reemplace el electrómetro y cumpla con los requerimientos del estudio.

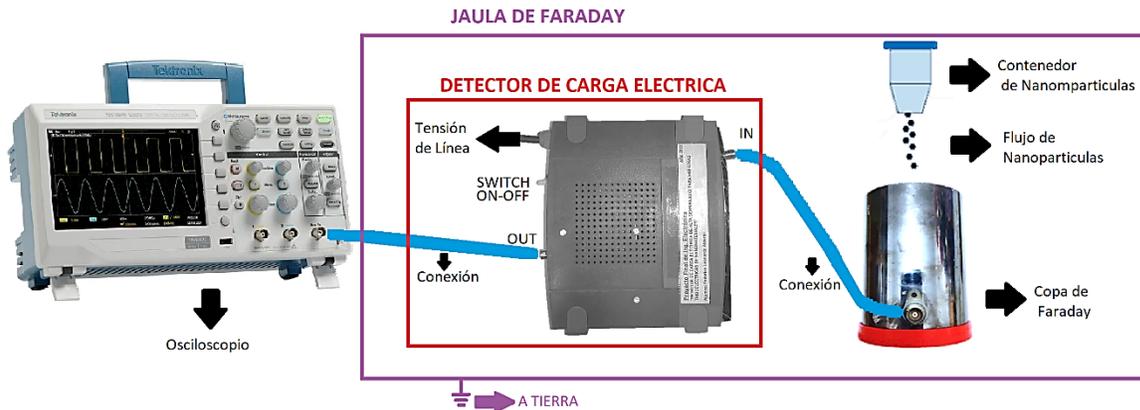
El desarrollo del detector se realizó en dos partes, primero se centró en: el desarrollo del PCB, su alimentación estable y limpia, las conexiones de gran exigencia, determinación de las características del sistema de medición complementario (copas y dispositivos) y el diseño de la carcasa. Esto se realizó en las instalaciones del laboratorio LEMD.

En segundo lugar, se debía realizar la calibración y contrastación del detector. Para esto, se necesitaba un electrómetro de alta calidad para ser utilizado como instrumento de referencia. A causa de no constar con uno, se decide realizar las pruebas en colaboración con el instituto ThEFI (Thüringer Energieforschungsinstitut), laboratorio ZET (Zentrum für Energietechnik), que se encuentra dentro de las instalaciones de la Technische Universität Ilmenau, Alemania. Esto fue gracias a una beca de intercambio realizada durante los años 2021/2022, donde se pudieron realizar las mediciones con un instrumento patrón, constatar el funcionamiento del detector y finalmente obtener las conclusiones correspondientes.

En del desarrollo de la segunda parte, se obtuvieron resultados positivos, constatando los límites de utilización del detector, linealidad y mejoras necesarias que se deben realizar en un futuro, para poder obtener mejores resultados con mayor estabilidad. También se pudo desarrollar el método óptimo para realizar las mediciones, eliminando las fuentes de errores que perturban la misma.

Finalmente se obtiene un detector, con las características necesarias para realizar las mediciones deseadas y de bajo costo. Siendo este último factor, el limitante en un principio para la realización del PID en las instalaciones del laboratorio LEMD.

En la siguiente ilustración se puede ver la disposición del sistema. El desarrollo se centra en el detector de carga eléctrica, este es el recuadrado en rojo. Algunos periféricos o sistemas complementarios se debieron desarrollar durante la primera etapa, aunque el objetivo central es el desarrollo del detector.



## 2.1 OBJETIVO GENERAL

Los objetivos generales de este proyecto son los siguientes:

- Desarrollo de un detector de carga eléctrica de alta sensibilidad para detectar cargas triboeléctricas, caracterización de nanomateriales y materiales físicos y biológicos.
- Obtener un producto final compacto, de fácil manipulación, buenas prestaciones y bajo costo.

## 2.2 OBJETIVO PARTICULAR

Los objetivos particulares de este proyecto son los siguientes:

- Determinar el estado del arte de los amplificadores con mejores prestaciones para implementar detectores que permitan el desarrollo de nuestro equipo.
  - Profundizar el método que permite la activación de captura de valores sin que se perturbe el sistema bajo prueba y permita realizar adquisiciones.
  - Desarrollo de una fuente de alimentación que no perturbe al detector durante la adquisición de datos y permanezca estable.
  - Diseñar e implementar un equipo que permita anexar un sistema de supresión de las interferencias electromagnéticas que puedan afectar al detector.
  - Se prevé realizar un equipo detector para la cátedra de Física 2 de la UTN-FRM para poder realizar prácticas de laboratorio y para la utilización en investigaciones en otros laboratorios y proyectos.

## 3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO (CASO DE NEGOCIO)

### 3.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Para comenzar, podemos tomar de punto de partida uno de los últimos hitos en ciencia que impulsará la tecnología y la forma en que hoy vemos al mundo a un nuevo nivel, este es la nanotecnología. la definición con más consenso científico y

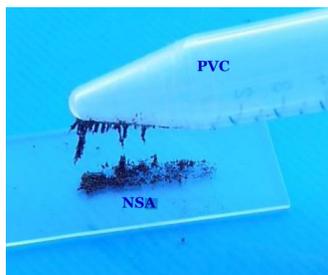


aceptación la ofrece la “National Nanotechnology Initiative” (Iniciativa Nanotecnológica Nacional):

“La nanotecnología es la comprensión y el control de la materia en dimensiones entre aproximadamente 1 y 100 nanómetros, donde fenómenos únicos permiten aplicaciones novedosas. La nanotecnología, que abarca la ciencia, la ingeniería y la tecnología a nanoescala, incluye la creación de imágenes, la medición, el modelado y la manipulación de la materia a esta escala de longitud...”

La nanotecnología implica el diseño, la síntesis y el procesamiento de las estructuras de escala nanométrica para aplicaciones en ingeniería y biotecnología. Los nanomateriales son de particular interés, porque en la nanoescala, muestran un nuevo comportamiento que puede ser explotado tecnológicamente, debido a que exhiben propiedades mecánicas, ópticas, electromagnéticas y químicas únicas. Sustancias con estructuras nanométricas <100[nm] ofrecen una amplia variedad de usos tecnológicos mejorados en comparación con los materiales o partículas de mayor tamaño de la misma sustancia.

En la actualidad se pueden observar diversas aplicaciones de la nanotecnología en la medicina, veterinaria, agricultura, electrónica, química, etc. Una de las aplicaciones a las que va orientada este proyecto, es la caracterización de polvos ultrafinos y materiales nanoparticulados. Más específicamente nos centramos en el nanoinsecticida NSA (alúmina nanoestructurada), del cual está en proceso de investigación por su fenómeno de adherencia de partículas a superficies biológicas como la de los insectos, relacionándose con la actividad triboeléctrica generada sobre su cuerpo y con la del nanoinsecticida NSA, provocando así la deshidratación del insecto y su posterior muerte. Viendo la gran ventaja de la NSA, como su baja toxicidad para humanos, plantas y animales, posible reutilización luego de la primera aplicación como insecticida, para conservar alimentos, para preservar productos forestales y otros, debemos caracterizar las propiedades de dicho material.



Citando una publicación de un grupo de investigadores del “Laboratorio de Toxicología Ambiental, Instituto de Medicina y Biología Experimental de Cuyo (IMBECU), CCT CONICET-Mendoza y Department of Land Resources and



Environment Sciences, Montana State University, Bozeman, MT, USA” referida al NSA:

“El desarrollo y registro de nuevos productos a partir de nanomateriales manufacturados se basa en el paradigma “lo mismo pero diferente”, ya que éstos difieren de las sustancias con idéntica estructura y composición química respecto de algunas propiedades como reactividad, área específica, efectos cuánticos, carga eléctrica, etc. Estas sustancias con nuevas propiedades también se destacan como herramientas muy prometedoras para la protección de cultivos y la producción de alimentos y abren nuevas fronteras para el manejo de plagas con nanoinsecticidas. La alúmina nanoestructurada exhibe varias de las propiedades del insecticida ideal, ya que se trata de un producto natural desde el punto de vista químico, no reactivo, económico, con reducidas probabilidades de provocar resistencia en los insectos y su eficacia es mayor que la de otros polvos insecticidas como el caolín o la tierra de diatomeas.”

De esta manera, podemos resumir que hay decenas de aplicaciones para este producto, pero antes de utilizarlas debemos determinar las características de mismo.

Para la caracterización de estas nanopartículas, la cuál es fundamental para el desarrollo del nanoinsecticida, es medir con extremada precisión los parámetros físicos que determinan su comportamiento frente a diferentes situaciones. Una de las características es la carga eléctrica, la cual determina cómo se comportará el mismo frente a superficies o materiales diferentes, propiedad que es medida por medio de electrómetros. Los fenómenos electroestáticos son visibles fácilmente, pero hay veces ciertos efectos no son tan fáciles de cuantificar. Partiendo de esta premisa podemos ahora abrir un nuevo campo de diferentes métodos y técnicas de medición con diversos instrumentos.

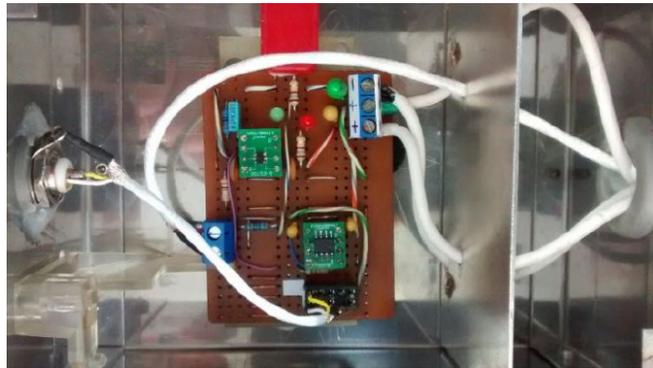
El electrómetro es un instrumento óptimo para medir la carga eléctrica de nanopartículas ya que su alta sensibilidad permite obtener los valores más aproximados a la realidad que rige los diferentes materiales. Un inconveniente a la hora de investigar este tipo de materiales es el alto costo de obtener un instrumento medianamente confiable de laboratorio o de campo para la medición de dicho parámetro.

La propuesta con este proyecto es el desarrollo de un electrómetro, construido con elementos preexistentes de buena calidad y de costo aceptable, con una calidad de medición contrastada y calibrada con instrumentos patrones, proporcionando así la confiabilidad necesaria para poder utilizarlo como un instrumento aplicable a un estudio experimental o trabajo de laboratorio; en conjunto con otros elementos (fuentes de alimentación, copas y jaulas de Faraday, cámara de temperatura y humedad controlada, cables coaxiales, cables triaxiales, etc.) construidos en forma paralela, de forma tal que formen un equipo para la medición y estudio de dichos materiales.



### **3.2 ESTADO ACTUAL**

Dentro del marco del PID se construyó un prototipo de electrómetro con circuitería electrónica basada en CI grado electrómetro de National Instruments LMP7721 y LMP7715. En lo referente al método de medición, como la carga es una magnitud que se obtiene de manera indirecta, se realizaron obligatoriamente mediciones de las capacitancias de entrada de los dispositivos ensamblados. La obtención del valor cuantitativo de la carga se hizo, como es usual, registrando el voltaje leído  $V_e$  a la salida del detector y efectuando el producto  $Q=V_e C_e$ . Estos procesos de calibración previa fueron repetidos 10 veces para obtener mayores certezas en los valores de las capacitancias y, por ende, del valor cuantitativo de la carga. De esta manera, es cómo funcionará también el nuevo prototipo de detector, aunque el procedimiento de calibración realizado fue distinto y la construcción no es de forma modular preensamblada, como muestra la imagen, sino que el diseño es consolidado en un único PCB, y su fuente de alimentación está integrada en una placa separada, pero dentro de la misma carcasa que el detector.



### **3.3 NECESIDAD DEL NEGOCIO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Ya que la compra de un electrómetro comercial no es posible, dado el alto costo y difícil adquisición, se busca realizar un detector de carga que permita cumplir con los requerimientos dados por las medidas a realizar. Este no debe ser modular como el que se ensayó anteriormente, sino que debe ser integrado en una misma placa. Además, su alimentación debe poder estar en el mismo equipo de manera compacta, para una fácil manipulación. Debe ser calibrado a través de un equipo patrón, de modo que pueda utilizarse luego este prototipo como referencia para la construcción de otros.

### **3.4 IDEA DEL PROYECTO**

Teniendo en cuenta los prototipos utilizados en el PID anteriormente, se busca utilizar dispositivos adecuados ya adquiridos por el laboratorio, para construir un



nuevo detector, integrado en un mismo PCB. Además, se diseña una fuente de tensión lineal, de modo que su suministro de energía sea lo más limpia posible, evitando así provocar errores en las medidas. El gabinete del detector podrá integrar tanto el detector, como la fuente, de forma compacta, permitiendo desarmar y armar cuantas veces sea necesario para corregir errores, limpiar, o modificar el sistema. Las entradas y salidas del detector se dispondrán de forma que la utilización del detector sea versátil.

Para realizar la calibración, se utilizarán dos métodos de mediciones de capacitancia de entrada, para luego corroborar la más acertada. Para aplicar estos métodos se construye una caja de prueba blindada, similar a una jaula de Faraday, donde se colocarán los dispositivos, dependiendo el método de medición de capacitancia de entrada. Esta caja deberá poder compatibilizar con el tipo de conector del detector.

Luego de obtener los valores de capacitancia de entrada del detector, los dispositivos utilizados y los conectores, se procede a realizar pruebas de contrastación con un electrómetro patrón comercial. Los valores obtenidos se utilizan para posterior utilización del detector. Las conclusiones de estas pruebas permitirán luego determinar que mejoras se podrían realizar para mejorar el sistema en un futuro.

### 3.5 BENEFICIOS DEL PROYECTO

El desarrollo de este detector, su calibración y contrastación, y desarrollo de la metodología de medición, no solo permitirá continuar con las mediciones del PID con el nuevo prototipo, sino que también permitirá proveer de un nuevo detector para el laboratorio de física 2 de la UTN FRM, de manera que se desarrollen prácticas más enriquecedoras para los alumnos. También permitirá desarrollar otros detectores basados en este, mejorando las características que no se adaptaron convenientemente.

## 4 ALCANCE

### 4.1 ALCANCE

El proyecto consta de la construcción del detector de carga eléctrica, su fuente de alimentación, el gabinete o carcasa, el desarrollo los elementos necesarios que corresponden con el proceso de contratación y calibración (copas de Faraday, jaula de Faraday, conectores y caja de prueba) y el desarrollo de la metodología de medición, comprobando distintos métodos de medición.

También se desarrolla el material técnico con los datos recopilados y los resultados estadísticos de este. Finalmente Se entrega el detector y los materiales utilizados al laboratorio donde se desarrolla el PID.

Este proyecto se comenzó junto al PID en 2018, aunque fue interrumpido a causa de fuerza mayor durante el aislamiento obligatorio, para ser continuado durante la estadía en Alemania y finalización en el año 2022.



#### 4.2 LÍMITES O FUERA DE ALCANCE

Este proyecto se limita al desarrollo del detector de carga eléctrica requerido por el laboratorio LEMD. Se incluye la construcción del gabinete y fuente de alimentación, permitiendo lograr un producto final listo para utilizar. Finalmente se informan las características del detector, capacitancia de entrada, tipo de conectores, magnitud de las adquisiciones que puede realizar y la información necesaria para poder utilizarlo. Se confeccionará un informe técnico, junto a la explicación de la forma en que se debe manipular el mismo, así como también la metodología realizada durante la contrastación. No se desarrollará ninguna otra funcionalidad ni característica fuera de lo definido. No incluye ningún desarrollo de software, instrumentación fuera de lo especificado ni elementos utilizados durante el desarrollo, a menos que sea indicado.

#### 4.3 REQUISITOS DE ALTO NIVEL

Req. #	Descripción del requisito
1	Linealidad del resultado al medir
2	Sistema compacto y estable
3	Descripción del método óptimo utilizado

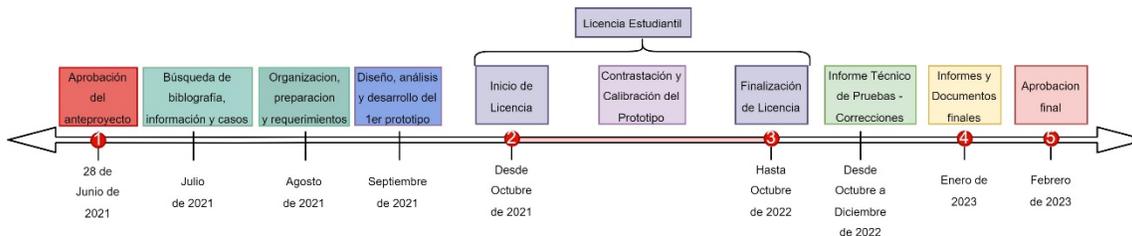
#### 4.4 SOLUCIONES Y ENTREGABLES PRINCIPALES

La siguiente tabla muestra un listado de los entregables del proyecto (productos o servicios)

Entregables principales	Descripción del entregable
<b>Documentación de Proyecto</b>	Se entrega la documentación del proyecto, junto con la información técnica del desarrollo del detector. Esto incluye alcances, objetivos, costos, etc.
<b>Detector de carga eléctrica terminado en forma física y sistemas secundarios</b>	Se desarrolla y termina la placa del detector, su gabinete y fuente de alimentación. También se entregan los sistemas secundarios (copas y jaula de prueba).
<b>Resultado de calibración estadístico.</b>	Se prueba el detector estadísticamente a través de la contrastación y se verifican los rangos de adquisición que permite para que al ser utilizado se puedan realizar las correcciones pertinentes y así obtener un resultado correcto. Se informa finalmente la terminación del proyecto con esta etapa.

### 5 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

Para una mejor comprensión de la planificación del proyecto, se utiliza un diagrama de seguimiento con su respectiva aclaración para cada etapa.



Aprobación del anteproyecto: En este punto comienza a desarrollarse el proyecto.

Búsqueda de bibliografía, información y casos: Se desarrolla una búsqueda de información y estudio del tema, se recopila información del PID, especificaciones y avances realizados en el área. También se plantea de forma básica el prototipo esperado, para alinear la búsqueda de información de dispositivos electrónicos afines.

-Cantidad de horas estimadas: 65.

Organización, preparación y requerimientos: Con la bibliografía e información recaudada se filtra y organiza lo esencial para comenzar a diagramar el desarrollo del prototipo, las características y los requerimientos. También se determina los métodos de calibración que se utilizarán y los posibles electrómetros a utilizar como patrones. Dada la posibilidad de realizar este último paso en Alemania, se proyecta su realización en un laboratorio de la universidad destino. También se utiliza información de desarrollos previos dentro del PID para el diseño.

-Cantidad de horas estimadas: 30.

Diseño, análisis y desarrollo del 1er Prototipo: A través de la información y los requerimientos, se diseña el detector. A través de los datos técnicos de los dispositivos disponibles en el laboratorio LEMD y el presupuesto previsto para el PID, se decide que el material que se utilizará para el diseño y la construcción del detector y su fuente de alimentación. Luego se desarrolla el gabinete y la disposición de las conexiones. Finalmente, el prototipo se le hace una prueba preliminar para determinar su funcionamiento, al igual que el de su fuente.

-Cantidad de horas estimadas: 115.

Licencia Estudiantil – Contrastación y calibración del prototipo: En esta etapa, se utilizan las instalaciones del laboratorio ZET (Zentrum für Energietechnik) de la universidad destino. Se desarrolla la contrastación a través de un electrómetro patrón homologado y se calibra el prototipo realizando mediciones a través de distintos métodos. La información se recopila para luego ser analizada, junto a la evidencia fotográfica.

-Cantidad de horas estimadas: 220.



Informe Técnico de Pruebas – Correcciones: Se realiza un informe respecto a la metodología que dio mejor resultado, se organiza la información y se dan los resultados estadísticos. Se grafica la información para un mejor entendimiento y se agregan las fotos correspondientes, junto a un video donde se muestra el procedimiento realizado. Finalmente, se utiliza esto para aprobar la etapa técnica del proyecto.

-Cantidad de horas estimadas: 60.

Informe y documentos finales: Se desarrolla la documentación correspondiente al trabajo realizado. El informe del proyecto se realiza teniendo en cuenta los tiempos en los que se desarrollaron las actividades, las expectativas y los objetivos logrados, según la supervisión del director del PID y sus correcciones. Por otro lado, se adjunta la documentación y se entrega el producto terminado.

-Cantidad de horas estimadas: 70.

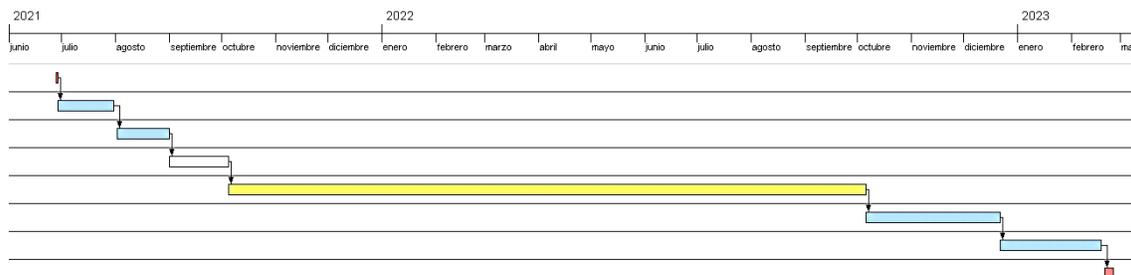
Aprobación final: Finalmente, luego de ser aprobado el informe final, se construye una presentación para exponer el proyecto ante la cátedra de proyecto final y se realiza un video explicativo para presentar el producto final.

-Cantidad de horas TOTAL: 560.

### 5.1 CRONOGRAMA



Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
Aprobación del Anteproyecto	28/6/21	28/6/21
Búsqueda de Bibliografía, Información y Casos	29/6/21	30/7/21
Organización , Preparación y Requerimientos	2/8/21	31/8/21
Diseño, Análisis y Desarrollo del 1er Prototipo	1/9/21	4/10/21
LICENCIA Contrastación y Calibración del Prototipo	5/10/21	5/10/22
Informe Técnico de Pruebas - Correcciones	6/10/22	21/12/22
Informes y Documentos Finales	22/12/22	17/2/23
Aprobación Final	20/2/23	24/2/23





## 5.2 HITOS

Hitos	Fecha de finalización
1- Aprobación del Anteproyecto	28 de junio de 2021
2- Desarrollo del 1er Prototipo	5 de octubre de 2021
3- Finalización de contrastación y obtención de valores para la calibración	5 de octubre de 2022
4- Entrega de informe técnico, del equipo detector e informe final	17 de febrero de 2023
5- Aprobación final del proyecto	24 de febrero de 2023

La tabla muestra un listado de hitos generales del proyecto y el cronograma de finalización. Estos pueden verse representados en el diagrama de seguimiento a través de una numeración.

## 6 DESARROLLO DEL PROYECTO

### 6.1 DESARROLLO TÉCNICO

#### 6.1.1 Introducción

A partir del PID CCUTNME0007754 del laboratorio LEMD, surgió la necesidad de construir un detector de carga eléctrica que permita realizar las mediciones correspondientes al desarrollo del PID. Para esto, se tuvo en cuenta las características que debería tener este detector, comparándolas electrómetros de banco comerciales, ya que estos no se pueden adquirir para realizar las mediciones.

Se tiene en cuenta desarrollos realizados con anterioridad, dentro del PID, de modo el prototipo que se base en los resultados obtenidos anteriormente con módulos prefabricados y el desarrollo del PCB de un detector prototipo anterior.

Luego de construir el detector, su fuente de alimentación y gabinete, junto a los elementos secundarios, se procede a realizar las pruebas. También se desarrollan métodos de medición y contrastación, para luego analizar estadísticamente los datos obtenidos. A través de los resultados, se calibra el detector, para futuras mediciones y futuros desarrollos de prototipos. Muchos de los elementos utilizados para la construcción fueron adquiridos con anterioridad por el laboratorio.

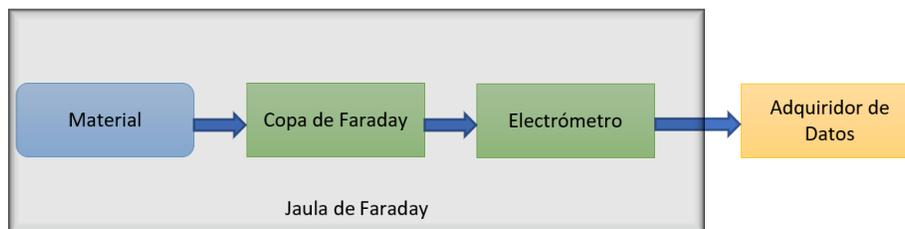
Finalmente se presenta el producto final, con los resultados obtenidos y posibles mejoras a realizar fuera de este proyecto.



### 6.1.2 Electrómetro – Detector de Carga

Para comprender la diferencia entre un electrómetro y un detector de carga, puede resumirse en las prestaciones y características principales. En un electrómetro medimos la carga eléctrica y la medida es expresada en coulomb, esto es, la unidad de carga eléctrica. En el caso del detector, lo que se hace es obtener la carga eléctrica de forma indirecta, a través del voltaje de salida del detector y la capacidad de entrada del sistema. Esto se resume con la fórmula  $Q=V \cdot C$ , donde  $Q$  es la carga que se quiere medir,  $V$  es la tensión de salida y  $C$  es la capacitancia de entrada del sistema. En el caso del detector, tiene un solo rango de medición, ya que está limitado por la tensión de salida del sistema amplificador del detector máxima y por el ruido que existe en el sistema.

Para comprender cómo se compone el sistema, la siguiente ilustración muestra la relación del detector con el sistema:



También existen otras características adicionales que tienen los electrómetros actuales, como fuentes de alta tensión disponible para el usuario, distintos rangos de medición, medición de corriente, medición de resistencias de alto valor, bajas pérdidas (menores al detector), cancelación de capacitancia de entrada, medición de tensión, impedancia de entrada de cientos de teraohms (en el caso del detector es de algunos teraohms), comunicación RS-232 y otros.

Dado el objetivo de nuestro proyecto, solo se desea realizar un sistema que permita obtener, de manera indirecta, la carga eléctrica de una muestra. Por lo que no se requerirá más que el circuito detector, la fuente de alimentación, y los elementos secundarios que permiten la adquisición (copas de Faraday, jaulas de Faraday, etc.).

Teniendo en cuenta que el detector mide tensión, su topología está basada en un amplificador operacional de entrada de muy alta impedancia y de alta ganancia, para evitar que el sistema perturbe y modifique las características originales de carga eléctrica de la muestra a medir.

### 6.1.3 Elección de los elementos activos

Para comenzar con el diseño, se tomó en cuenta los prototipos anteriores realizados en el PID. También se propusieron 3 modelos de amplificadores principales que podrían utilizarse como etapa de entrada del detector. Estos



amplificadores están disponibles en el laboratorio, por lo que no se requirió realizar una compra. Los 3 posibles fueron:

OPA128 de National Semiconductor®

ADA5430 de Analog Devices®

LMP7721 de Texas Instruments®

Luego de analizar las características de cada uno, tomando de referencias prototipos anteriores del PID y el diseño de una placa de prueba suministrada por National Instrument®, donde utiliza el LMP7721 como detector y el LMP7715 como amplificador que alimenta la guarda, se decide utilizar este último para realizar el nuevo prototipo.

### 6.1.4 Fundamentos del diseño

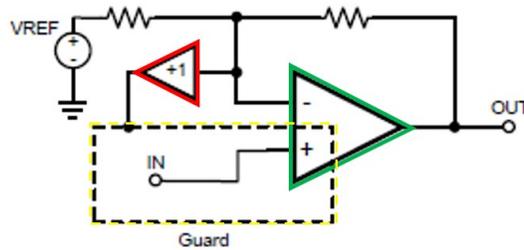
Para comenzar, se utilizó de base el circuito suministrado por National Instrument® llamado “LMP7721 Multi-Function Evaluation Board Users' Guide”, donde se muestra las distintas funciones programables del amplificador. Dado que en nuestra aplicación solo se utilizará la función para detectar carga eléctrica, o sea, amplificador de tensión de alta impedancia, se reduce el circuito y se ajusta para que quede compacto.

En la placa estándar se utiliza el LMP7715 como guarda, y los demás elementos son dispositivos pasivos. También se utiliza una configuración de conexión triaxial, la cual permite la conexión de la guarda con el sistema de medición (por ejemplo: copa de Faraday). La fuente de tensión será lineal, regulada y para que el detector pueda incursionar en valores positivos y negativos, se diseña la fuente partida con tensiones positivas y negativas. La fuente es lineal, ya que la fuente conmutada genera ruido en la línea y podría generar perturbaciones en la medición.

### 6.1.5 Diseño del Sistema

#### 6.1.5.1 Detector de Carga y Guarda

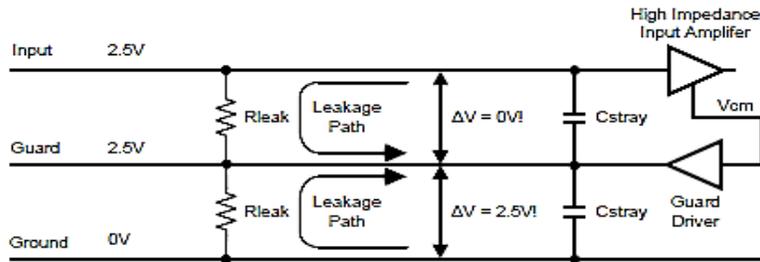
Como se especificó anteriormente, el detector mide tensión, y esta medición puede perturbar la muestra, ya que, el efecto de medir hace que la carga almacenada en la muestra se derive al sistema. Si tenemos en cuenta que la muestra contiene una carga eléctrica muy baja, cualquier filtración de los electrones a través de los materiales del sistema hace que la medición sea incorrecta. Para evitar esta fuga de carga, o corriente de fuga, se utiliza un sistema de guarda. Este sistema se puede explicar con el siguiente diagrama:



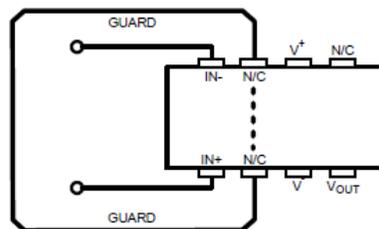
El amplificador operacional de color verde es el LMP7721 funcionando como detector y el amplificador operacional de color rojo es el LMP7715 funcionando como amplificador que alimenta la guarda en color amarillo.

La guarda alrededor de la entrada se utiliza para evitar diferencia de potencial con otras pistas y tierra, de modo que la aislación proporcionada disminuye fuertemente las corrientes de fuga, acercando la medición al valor real, prácticamente sin perturbar las características iniciales. Cualquier ruido que quiera ingresar sería absorbido por la guarda, ya que tiene baja impedancia.

El efecto podría mostrarse a través del siguiente esquemático:



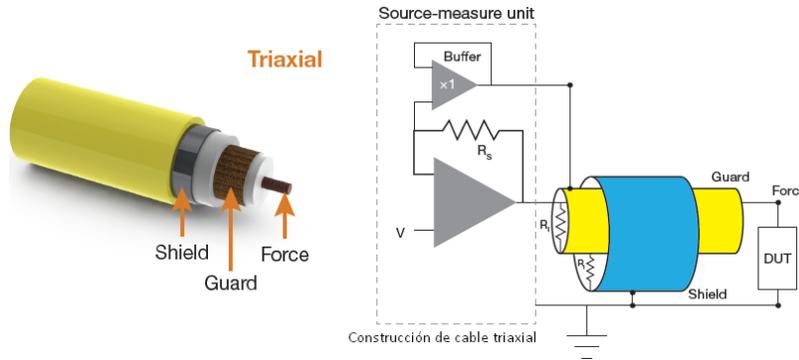
Entre la entrada y la guarda hay una diferencia de potencial cercana a 0 [V], por lo que la corriente de fuga es prácticamente nula. La ubicación de la guarda sería idealmente la siguiente:



Esto cubre las entradas del amplificador, de modo que no interactúe eléctricamente con otras pistas. Para poder realizar las conexiones con la copa, y que la guarda siga teniendo efecto hasta el punto directo de conexión, debemos utilizar una conexión triaxial, la cual proporciona una “extensión” de la guarda entre



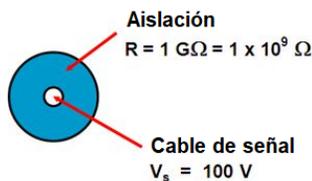
la copa y el detector, permitiendo mantener baja la corriente de fuga. Esto se explica fácilmente con la siguiente ilustración:



En esta imagen vemos que la guarda esta entre el conductor principal la tierra, de modo que interviene nuevamente aislando el conductor principal de la tierra, disminuyendo la corriente de fuga. Para representarlo en números, podemos ver la comparación de cómo afecta la guarda en una conexión triaxial respecto a la conexión coaxial con cables:

#### Diferencias entre cable Coaxial y Triaxial

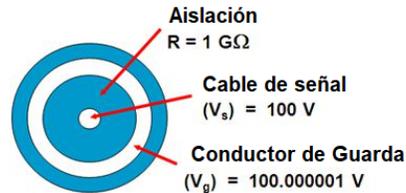
##### BNC (Coaxial) Cable:



Corriente de Fuga:

$$\frac{100 V}{1 \times 10^9 \Omega} = 100 nA$$

##### Triaxial Cable:



Corriente de Fuga:

$$\frac{(100.000001 V - 100 V)}{1 \times 10^9 \Omega} = 1 fA$$

El cable Triaxial reduce la corriente en un factor de 100.000.000

### 6.1.5.2 Capacitancias y Capacitancia de Entrada

El sistema detector y sus periféricos (fichas de conexión, cables utilizados, copa de Faraday) tienen una capacitancia intrínseca que interviene en la medición. La capacitancia de entrada del detector y la del sistema como conjunto de elementos es sumamente importante ya que el detector da como salida un valor de tensión V, el cual, a través de la capacitancia del instrumento C y la expresión  $Q=C \cdot V$  obtenemos la carga de la muestra. El resultado de esta ecuación es el dato

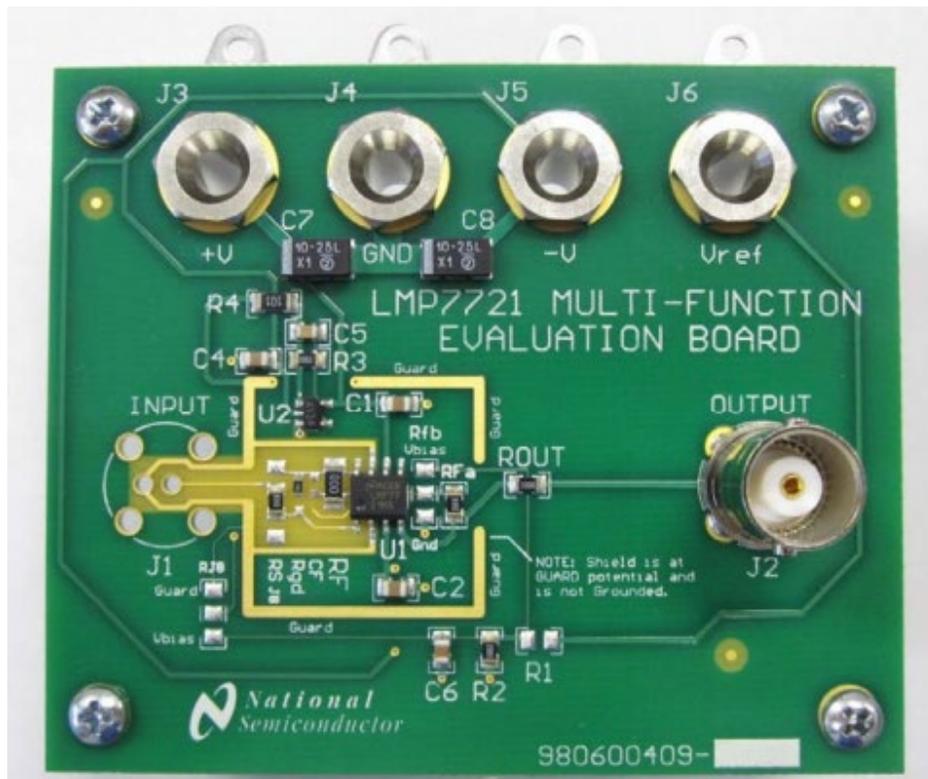


que buscamos, ya que nos dará la carga eléctrica del material que se analiza y su caracterización electroestática.

De ahora en más, se refiere la capacitancia de entrada a la capacitancia total del sistema de medición, incluyendo la capacitancia de entrada del electrómetro, de los cables, etc. Por esto, se debe medir la capacitancia de cada elemento que interviene en la medición. Para la medición de la capacitancia de entrada del detector es necesario aplicar métodos diferentes para obtener su valor. Estos métodos se explican más adelante. La capacitancia de copa de Faraday, los conectores y cables es fácil de cuantificar con un instrumento de medición LCR de laboratorio, por lo que no se fijará la atención en dichas medidas, solo se registraran los datos obtenidos.

### 6.1.5.3 Placa “LMP7721 Multi-Function Evaluation Board Users' Guide”

Del análisis de la placa de evaluación multifunción LMP7721 se obtienen las distintas funciones que se pueden implementar con el amplificador LMP7721 junto al LMP7715.



La Placa de Evaluación LMP7721 proporciona una plataforma para probar el rendimiento de la corriente de polarización entrada ultra baja del amplificador operacional LMP7721. El amplificador LMP7721 está optimizado para aplicaciones

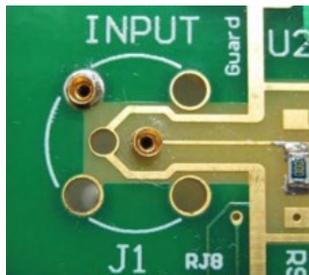


de corriente de polarización de entrada ultra baja utilizando técnicas de protección interna y un paquete especial de pines de salida para aislar las entradas del amplificador de su fuente de alimentación y pines de salida.

Estos pines de salida también permiten espacio para una protección adecuada alrededor de los pines de entrada y el circuito de retroalimentación. La Placa de Evaluación multifunción LMP7721 se puede usar para evaluar el LMP7721 en las configuraciones de inversión, no inversión y transimpedancia ("TIA" o "I a V"). El diseño ha sido optimizado para una operación con sub-picoamper, utilizando materiales FR4 convencionales mediante técnicas de diseño y protección cuidadosas. Un segundo amplificador de precisión LMP7715 (U2) actúa como un conductor de guarda para proporcionar una protección activa a los circuitos de entrada. El búfer LMP7715 toma muestras del voltaje en el nodo sumador de LMP7721 y conduce las huellas de guarda a un potencial idéntico.

La Placa de Evaluación LMP7721 viene ensamblada con todos los componentes preinstalados para la configuración búfer no inversora. El conector de entrada J1 está incluido en el kit como un BNC estándar, pero no está montado en la placa. Esto permite al usuario configurar la entrada para otros propósitos. Otras configuraciones requerirán la modificación del componente por parte del usuario.

Dado que el diseño de la placa este hecho para distintas funcionalidades se toma como referencia la que se adapta mejor a nuestra aplicación, esta es la no inversora. También se tiene en cuenta la topología del diseño de las conexiones, como la ubicación de la guarda, el tamaño de las pistas, los filtros, etc.



Hay que tener presente que la guarda elimina la capacitancia generada en las pistas y cables triaxiales, pero la capacitancia de entrada intrínseca del amplificador no se puede eliminar, por lo que con los métodos de medición se determinará la capacitancia de entrada total.

Se observa que las trazas anchas das alrededor del área de guarda proporcionan lo necesario para que en ese lugar se pueda soldar un blindaje de metal opcional para proveer un blindaje electrostático completo. Se debe tener en cuenta que los blindajes metálicos no están unidos a tierra, sino al voltaje de guarda. Con el cuidado de no cortocircuitar los blindajes a tierra o de usarlos inadvertidamente como puntos de prueba de conexión a tierra para equipo de prueba ya que dañaría el chip.



#### **6.1.5.4 Consideraciones del Diseño**

Para la realización de la placa se consideró la aislación y alta sensibilidad que debe presentar el circuito de entrada, de modo se utiliza el amplificador de entrada (LMP7721) en configuración No Inversora y modo búfer, o sea, se hace una copia de la entrada, en la salida. Tomando como referencia las características de diseño del circuito de entrada de la placa de evaluación descrita anteriormente, se realizaron una serie de modificaciones y agregados:

1) La entrada a la etapa se realizará a partir de un conector triaxial que estará vinculado al circuito de guarda y la salida se obtendrá a partir de un conector BNC de forma similar a la placa de evaluación.

2) Se incluirá un relay (relé) electromecánico, destinado a derivar a tierra la entrada de la etapa a fin de eliminar cualquier vestigio de señal (efecto memoria) luego de realizar una medición. A su vez, se debe considerar la posibilidad de poder accionar el relé mediante un pulsador dispuesto en la misma placa o mediante una señal externa.

3) Se diseñará un circuito de guarda destinado a aislar la entrada del Amplificador LMP7721. Además, se debe tener en cuenta que la guarda tendrá que cubrir el lazo que deriva la entrada del LMP7721 a tierra por medio del relé y también se deberá vincular los terminales N/C (No Internal Connection) del Amplificador al circuito de guarda tal como se recomienda en la hoja de datos del LMP7721.

4) La alimentación de la etapa será externa, por lo tanto, se deberá incluir una bornera en la placa destinada a conectar la fuente de alimentación.

5) Se debe incluir el plano de tierra sólo donde sea necesario, de manera que este no influya en la medición.

6) Para el caso de las pistas de tierra, se debe cuidar que no sean demasiado gruesas.

7) El circuito de guarda por arriba de la placa también tiene que cubrir el terminal del relé y por la parte inferior de la placa también se debe cuidar del que el LMP7721 quede dentro del circuito de guarda.

8) Las pistas de la guarda deben ser de un grosor mucho mayor que el resto de las pistas.



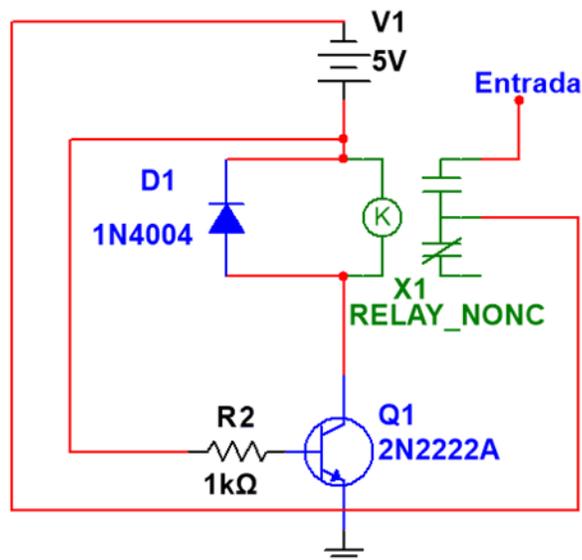
9) El plano de tierra, así como cualquier componente que pueda influir, especialmente, los capacitores, tienen que estar alejado lo suficiente del circuito de Guarda.

10) Con respecto al tamaño de la placa se tratará de que se lo más pequeña posible.

11) En el caso de los conectores de entrada, salida y los conectores de alimentación se cuida de que queden alineados de la mejor forma posible, pero en especial, se trata de que el conector triaxial de entrada quede alineado con el conector BNC de salida.

### 6.1.5.5 Sistema de Reset

Se utilizará un circuito para eliminar el efecto memoria del circuito detector, este servirá para eliminar los vestigios de carga almacenada en la entrada del sistema y así poder realizar una nueva medida. El funcionamiento se explica a través del funcionar del relé, el cual es activado mediante un transistor que se alimenta cuando se acciona un pulsador. Cuando esto sucede, el transistor comienza a conducir y el relé se activa pasando a poner a masa la entrada del electrómetro para eliminar la carga. El diodo en inverso hace que no afecte considerablemente el transitorio producido por la inductancia del relé. A continuación, se muestra el circuito realizado.



Se realiza un listado de los elementos utilizados y una breve característica de cada uno:

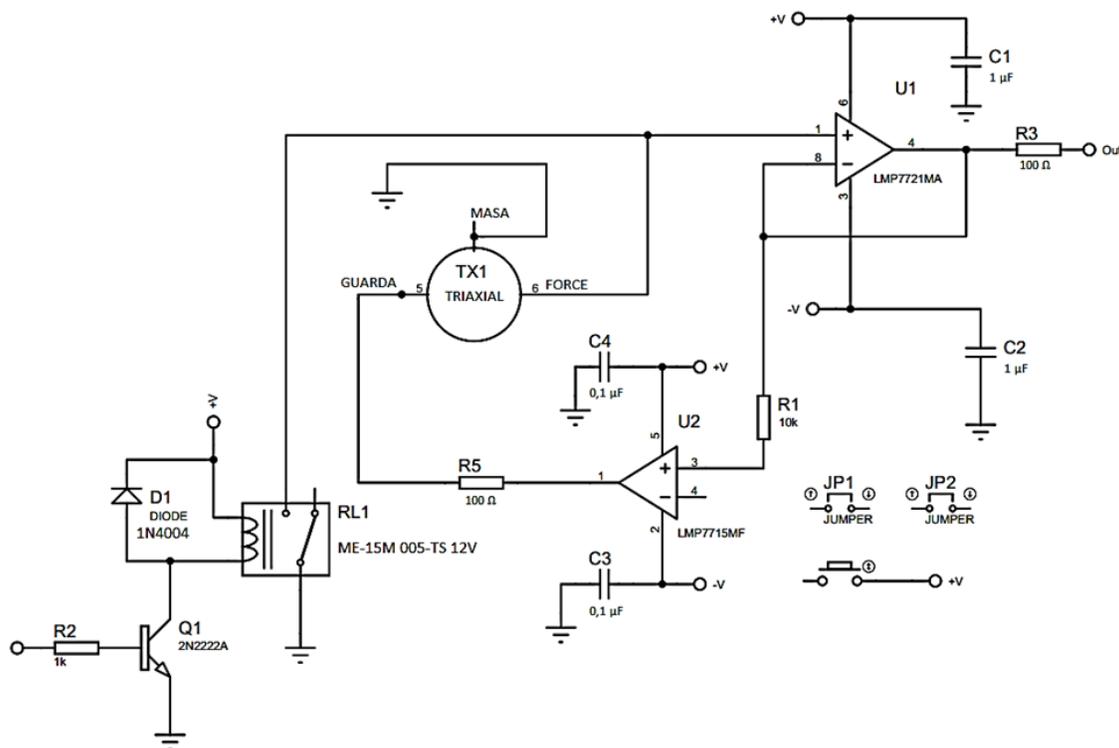


- Diodo: Diodo D1 modelo 1N4004 de PHILIPS®.
- Relay (Relé): Relé X1 modelo ME-15M 005-TS marca MASSUSE® de 5 [V] y 10 [A].
- Transistor: Transistor 2N2222A de PHILIPS®.
- Resistencia: Resistencia R2 de carbón de 1 [KΩ].

**ACLARACIÓN:** Durante las pruebas realizadas en la calibración, se encontró que el utilizar un relé para proporcionar un reset de la medición genera un cambio y aumento de la capacidad de entrada del circuito, por lo que se decide desactivar esta etapa para realizar la calibración y se propone, como mejora y fuera del alcance de este trabajo, diseñar un circuito que evite este problema.

## 6.1.5.6 Circuito Detector

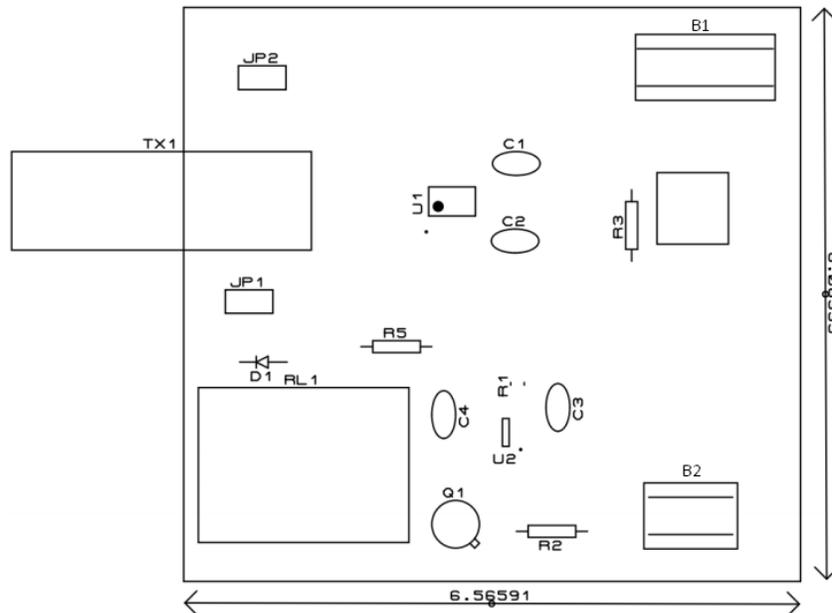
Luego del análisis realizado, se llega al diseño del siguiente esquemático:



Vemos que las salidas de los amplificadores están conectados a las resistencias de 100 [Ω] para limitar la corriente de salida. La alimentación está conectada a capacitores de filtrado adicionales a los que aparecen en el esquemático para eliminar el ripple o ruido acoplado a la alimentación. La conexión del amplificador de guarda esté acoplada con una resistencia de 10 [kΩ]



La distribución de los componentes en la placa se ve como muestra la siguiente ilustración:



Hay que hacer énfasis de que JP1 y JP2 son los puentes o bien llamados jumpers y que B1 y B2 son borneras. También que en la misma no se muestra por donde pasa la guarda ni que elemento está conectado. Solo es una representación espacial.

Se realiza un listado de los elementos utilizados y una breve característica de cada uno:

- Circuito de Relé ya especificado.
- Tx1: Ficha Triaxial de entrada.
- Tx2: Ficha BNC de salida.
- Resistencias:
  - Resistencia R1 de carbón de 10 [K $\Omega$ ].
  - Resistencias R3 y R2 de metal de 100 [ $\Omega$ ].
- Capacitores:
  - Cerámicos: Capacitores C3 y C4 marca COSONIC® de 100 [nF] y 50 [V].
  - Tantalio: Capacitores C1 y C2 marca SPRAGUE® de 1[ $\mu$ F] y 10 [V].
- Jumpers: Jumpers JP1 y JP2.
- Borneras: B1 con 3 entradas para alimentación y B2 con 2 entradas para el circuito de Relé.
- Amplificadores: U1 es el LMP7721 y U2 es el LMP7715.



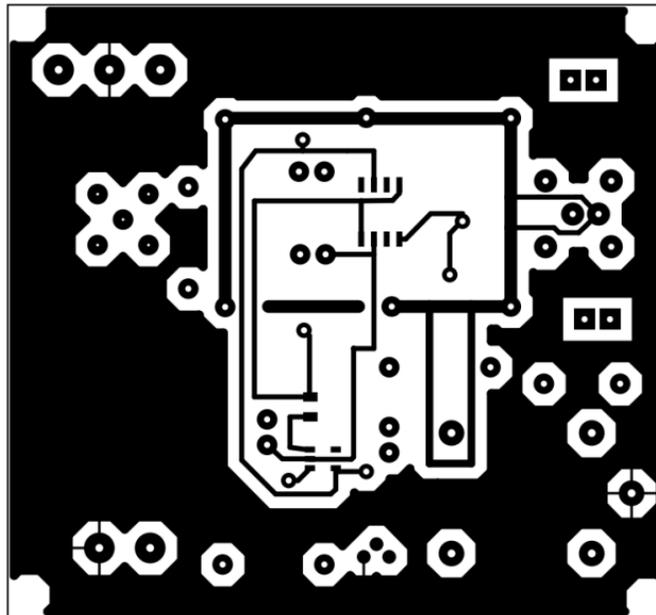
- Placa (PCB): Placa de 7 [cm] y 6 [cm] con doble capa de cobre marca PERTINAX®.

La construcción de la placa se realizó a través del traspaso de la tinta del negativo al PCB utilizando calor. Luego se prosiguió a eliminar el excedente de cobre marcado con color blanco y quedando solo el cobre que hace referencia el color negro marcado en la imagen del negativo de la placa. También se dejó impreso el esquemático de las posiciones de los componentes en el mismo.

Posteriormente se realizaron las perforaciones mostradas con circunferencias en la imagen negativo de la placa, de la cual se corresponden a el lugar donde atraviesan los terminales de los componentes con un grosor de mecha aproximado de 1 [mm] y luego las perforaciones de los tornillos que sostienen la fuente a la caja del instrumento.

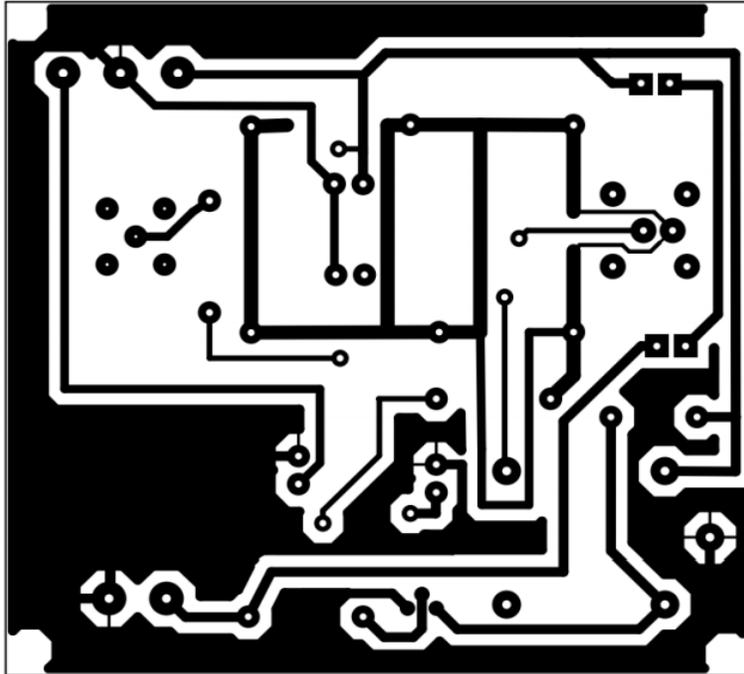
Después se soldaron los elementos a la placa con estaño y por ser algunos del tipo montado superficial se debió concurrir a una estación soldadora. El circuito de relé constó con un inconveniente a la hora de ser instalado a causa de su circuito interno; este traía las conexiones internas de manera invertida por lo que se prosiguió a instalarlo en el lado trasero. Después de esto se instaló la ficha de salida y la conexión de entrada se soldó directamente.

Teniendo en cuenta todos los elementos se presentarán fotos de la placa impresa, armada y conectada como también el negativo del circuito que se imprimió en el PCB. La cara frontal es la siguiente:

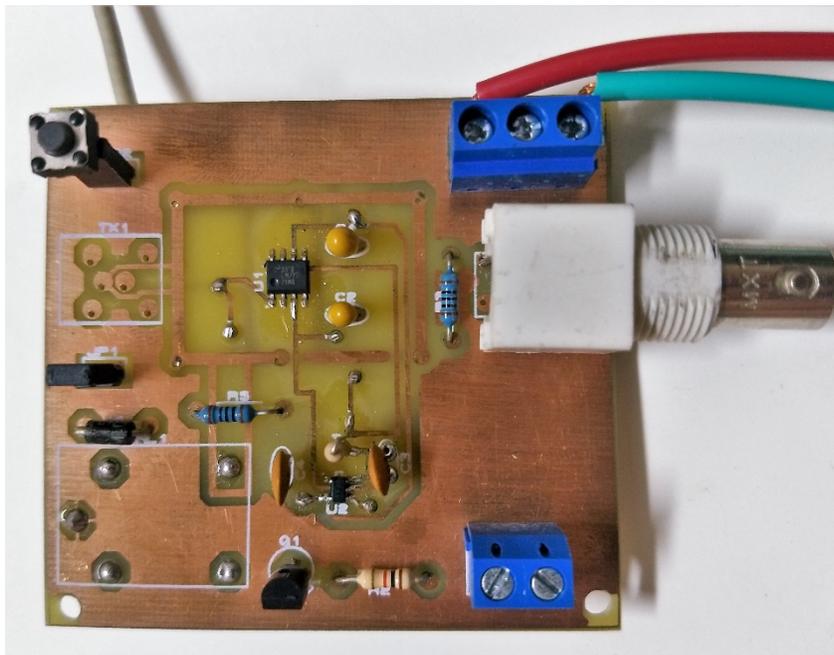




La cara trasera es la siguiente:

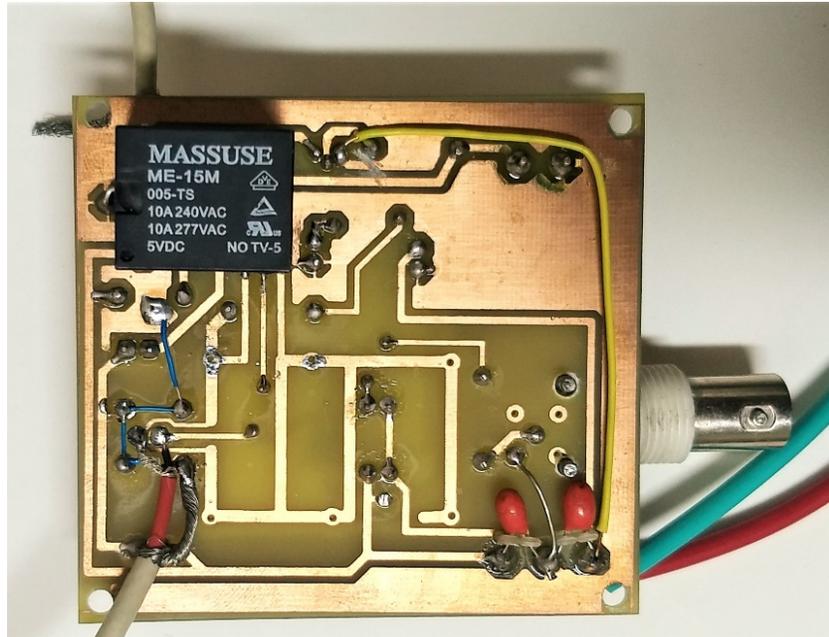


La cara frontal con los componentes soldados:

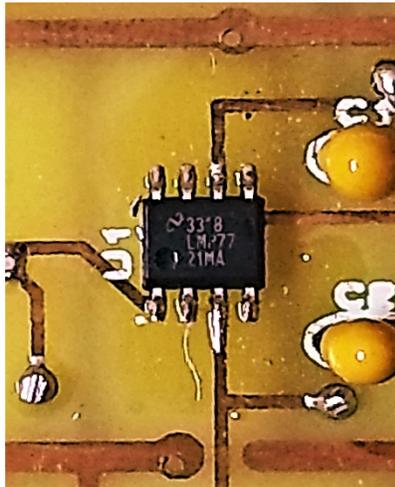




La cara trasera con los componentes soldados:

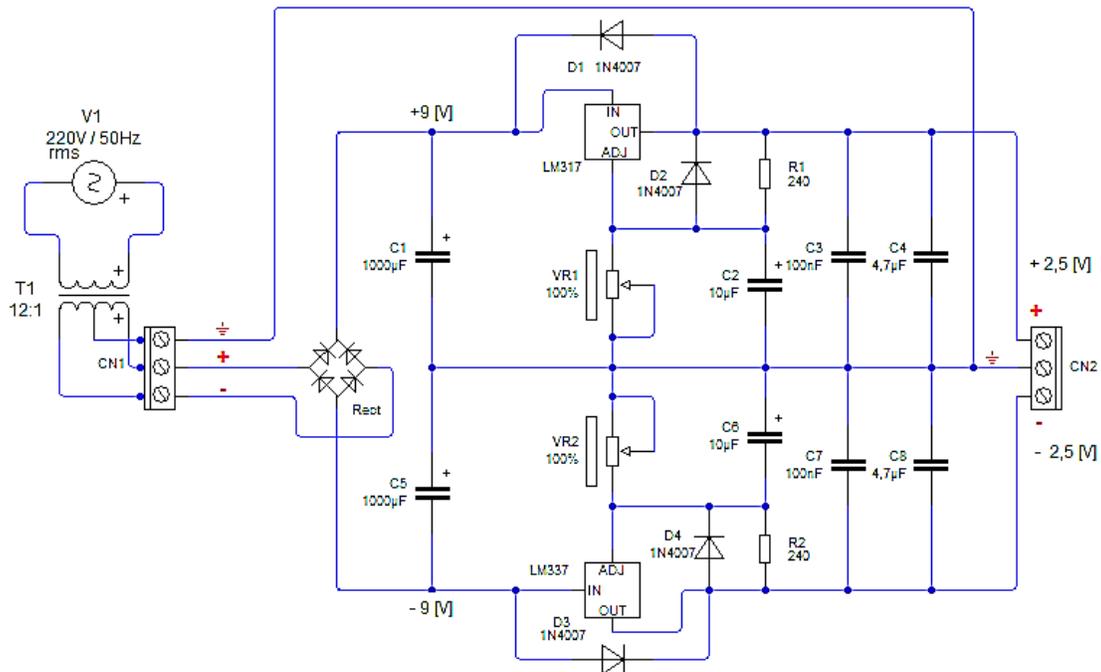


En las siguientes dos imágenes se ve U1, siendo este el LMP7721, y U2, siendo este el LMP7715:



### 6.1.5.7 Fuente de Alimentación

La construcción de la placa de alimentación parte del siguiente esquemático:



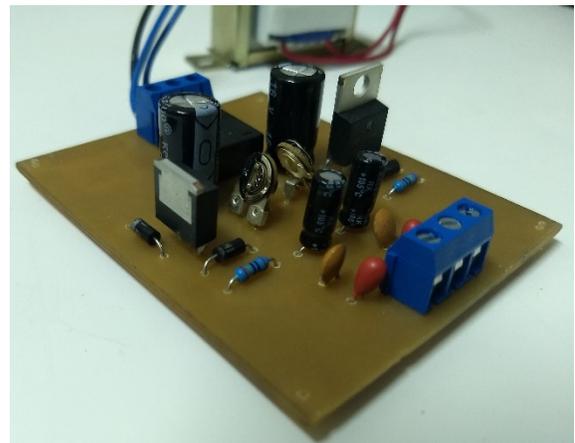
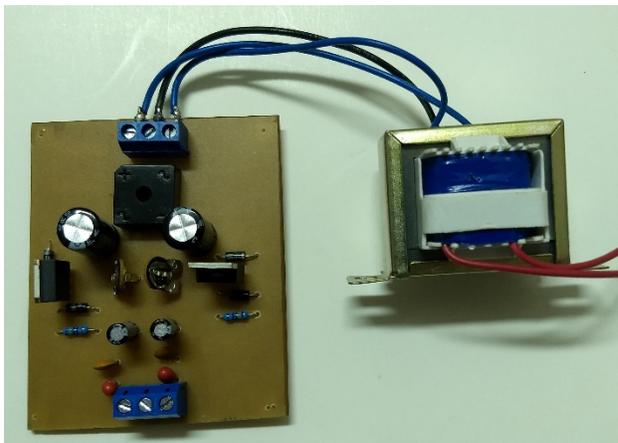
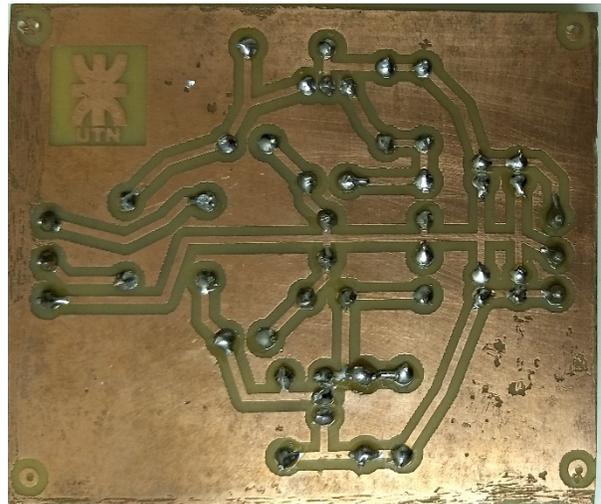
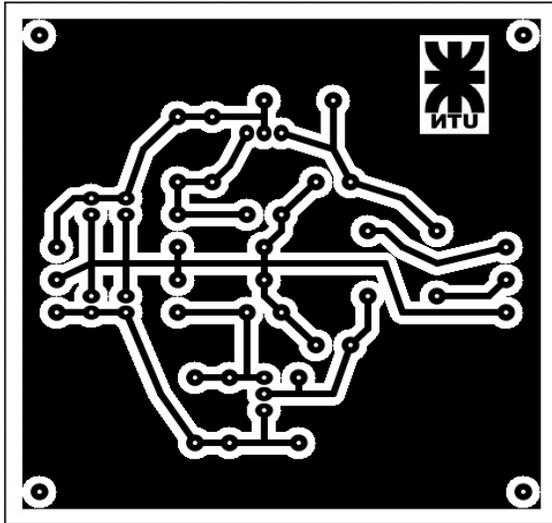
Se realiza un listado de los elementos utilizados y una breve característica de cada uno:

- **Alimentación:** Energía tomada de la línea de suministro general, 220 [V]rms a 50 [Hz].
- **Transformador:** Transformador marca LUXEL® partido, 9+9[V] y 500[mA].
- **Borneras:** Borneras CN1 y CN2 de tres entradas.
- **Rectificador:** Rectificador Rect. de onda completa marca WTE® modelo KBPC310 de 1000 [V] y 3 [A].
- **Capacitores:**
  - Electrolíticos: Capacitores C1 y C5 marca KETUO® de 1000 [µF] y 16 [V]. Capacitores C2 y C6 marca KETUO® de 10 [µF] y 25 [V].
  - Cerámicos: Capacitores C3 y C7 marca COSONIC® de 100 [nF].
  - Tantalio: Capacitores C4 y C8 marca SPRAGUE® de 5,7 [µF] y 10 [V].
- **Diodos:** Diodos D1, D2, D3 y D4 marca PHILIPS® modelos 1N4007 de 1000 [V] y 1 [A].
- **Resistencias Variables:** Presets VR1 y VR2 de 1 [KΩ].
- **Resistencias:** Resistencias R1 y R2 metálicas de 240 [Ω].



- Reguladores de Tensión:
  - LM317 marca TEXAS INSTRUMENTS® hasta 37 [V] y 1,5 [A].
  - LM337 marca TEXAS INSTRUMENTS® hasta -37 [V] y 1,5 [A].
- Placa (PCB): Placa de 7,6 [cm] y 6,5 [cm] marca PERTINAX®.

Teniendo en cuenta todos los elementos se presentarán fotos de la placa impresa, armada y conectada como también el negativo del circuito que se imprimió en el PCB.



La impresión del circuito se realizó de la misma manera que la del detector. Se realizaron las perforaciones mostradas con circunferencias en la imagen negativo de la placa, de la cual se corresponden a el lugar donde atraviesan los terminales de los componentes con un grosor de mecha aproximado de 1 [mm] y luego las perforaciones de los tornillos que sostienen la fuente a la caja del instrumento. Después se soldaron los elementos a la placa con estaño y se instaló



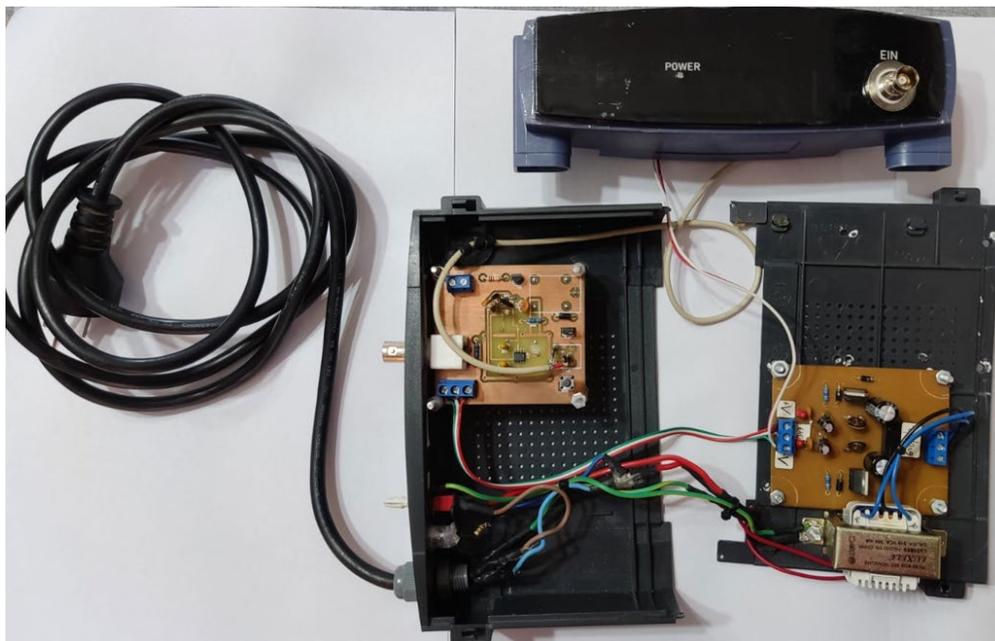
el transformador a través de la bornera CN1, pasando a través de una llave de dos posiciones que comandará la alimentación del sistema completo.

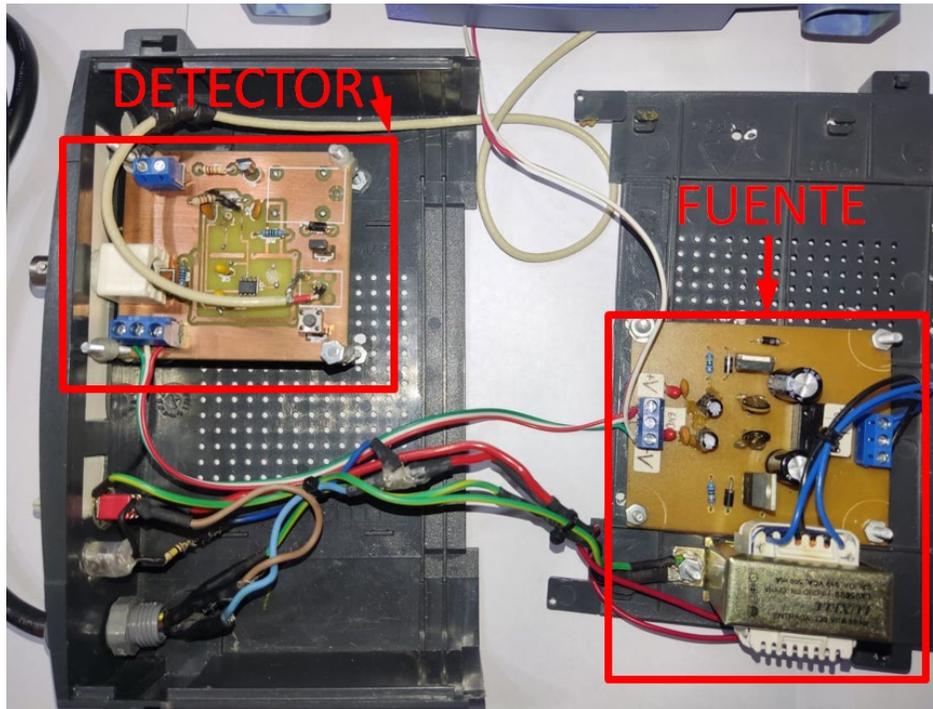
Se ajustan los presets para obtener a la salida  $\pm 2,5$  [V] y se observa una tensión de ripple prácticamente nula para nuestra aplicación. Con la fuente probada, se prosiguió al armado del conjunto de fuente de alimentación y electrómetro. Se realizó la medición de ruido y ripple de la fuente de alimentación construida a través de un osciloscopio analógico marca Pintek, modelo: PS-205 (20MHz). Esta medición muestra un ruido de alta frecuencia a 2[mV] pico a pico, de manera difusa. Esto se atribuyó a las interferencias electromagnéticas y ruido de línea (fuentes switching, radiodifusión, ruido en la tierra).

### 6.1.5.8 Gabinete

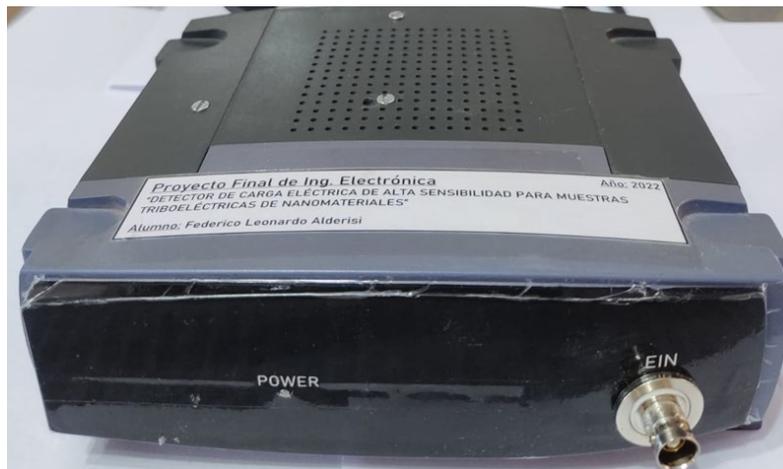
Para obtener un producto compacto, se buscó la posibilidad de reutilizar un gabinete que se amolde al sistema detector-fuente y luego adaptarlo para una su función. Se utilizó un gabinete de un router fuera de operación, de modo que se agregaron las perforaciones, perillas, conectores, luces testigo y panel frontal correspondiente.

Este gabinete permite ser desarmado fácilmente y es compacto, de modo que pueda ser fácilmente transportable. Las placas fueron instaladas a través de tornillos, que se mantienen aislados de estas a través de separadores. Las siguientes ilustraciones muestran el interior y el exterior del sistema detector:





La siguiente ilustración es del frente del detector se encuentra la entrada marcada con la palabra “EIN”, y un led testigo que muestra cuando el detector está midiendo:



La siguiente ilustración es de la parte trasera del detector, donde se encuentra la perilla de encendido “EIN” y apagado “AUS” del detector, un led testigo que contempla la conexión al tomacorriente y la salida del detector “AUS”:



La siguiente ilustración muestra la base del gabinete, elevando el detector respecto a la superficie de apoyo y aislando el dispositivo:



#### 6.1.5.9 Periféricos

Las copas con las que se realizan las mediciones son dos, una permite conexión coaxial y la otra permite conexión triaxial. Estas se deben medir a través de un medidor de impedancia para realizar las pruebas. Estas se ven en las siguientes fotos:



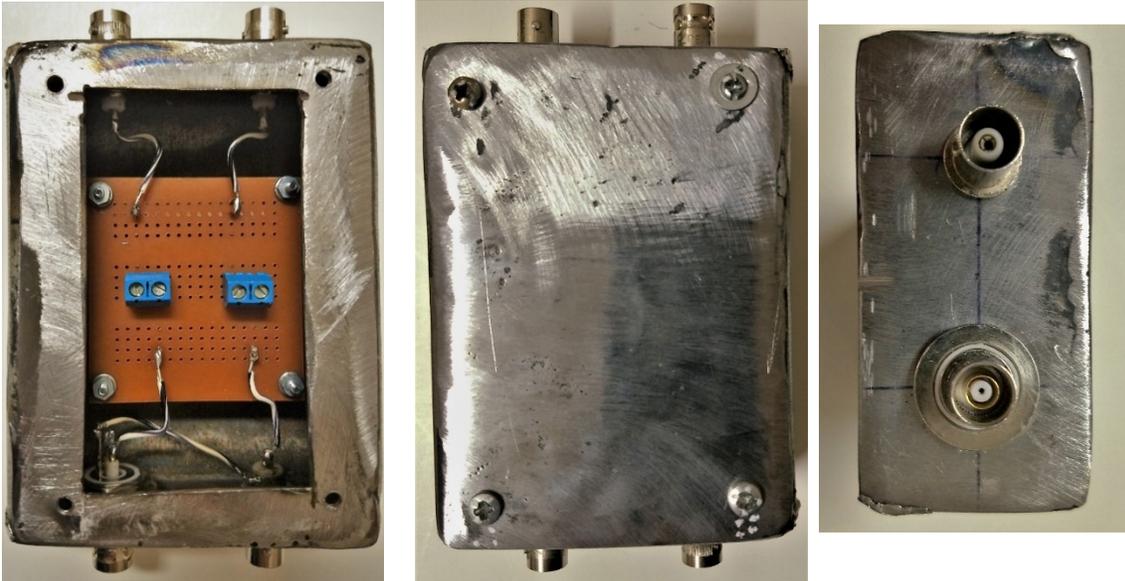
Por otro lado, se construyó una caja de prueba blindada, que permite tanto conexión coaxial, como triaxial. Esta será utilizada para los métodos de medición de impedancia de entrada del detector, de modo que los dispositivos pasivos conectados en su interior están aislados de posibles acoplamientos electromagnéticos y ruidos del exterior. Los dispositivos pasivos se conectan a través de borneras.

La caja se construye a partir de un caño estructural de medidas 7,5 [cm]·10[cm]·3,75[cm] con un grosor de 2[mm]. A la misma se les sueldan tapas a los extremos, se complementa los bordes interiores para que quede un blindaje de mayor calidad y se realiza la tapa que cubrirá la placa. Se esmerila y lija la superficie para encontrar alguna filtración o agujero que pueda desmejorar el funcionamiento. También se procede a realizar los orificios para las fichas BNC y el triaxial, los orificios por donde pasarán los tornillos que sostendrán la placa de conexión y los orificios de la tapa.

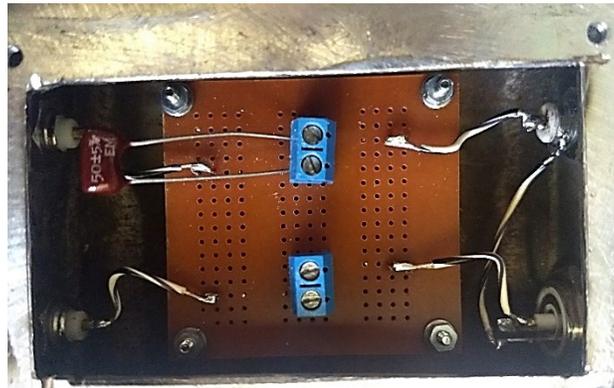
La placa donde se conectan las resistencias y el capacitor es una placa perforada para la cual se sueldan dos borneras con dos entradas cada una y se conectan los cables respectivamente. De esta manera podremos cambiar las resistencias y el capacitor para tomar diferentes medidas. En las siguientes



ilustraciones se observa la caja. Del lado izquierdo de la primera ilustración se encuentra la conexión triaxial y del lado derecho se encuentra la conexión coaxial.



Aquí vemos un ejemplo de conexión para el caso coaxial:

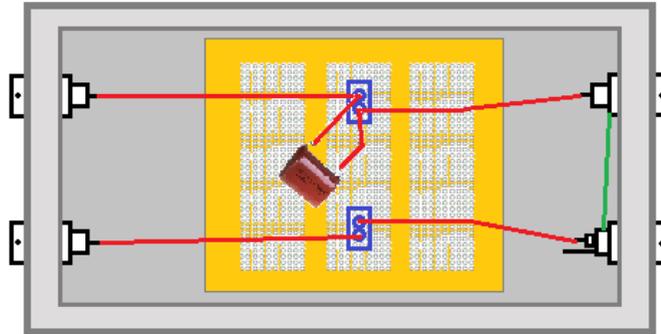


Para comprender la conexión, podemos observar en el siguiente esquemático la representación del ejemplo anterior. Las conexiones rojas representan la conexión del conductor central, en verde se conecta la masa de la ficha triaxial a la ficha BNC, ya que esta última está directamente conectada a la carcasa conductora y a las demás fichas. El conductor de guarda queda sin conectar, de modo que la protección llegue hasta la entrada de nuestra caja.

Vemos que el componente conectado en el interior cierra el circuito, para que pueda aplicarse el método correspondiente. Vemos que el componente se ajusta a



una bornera a través de unos tornillos. En el caso de las capacidades, sus conductores deben quedar paralelas y lo más parecido a la posición de fábrica, para mantener su capacitancia característica lo más constante posible.



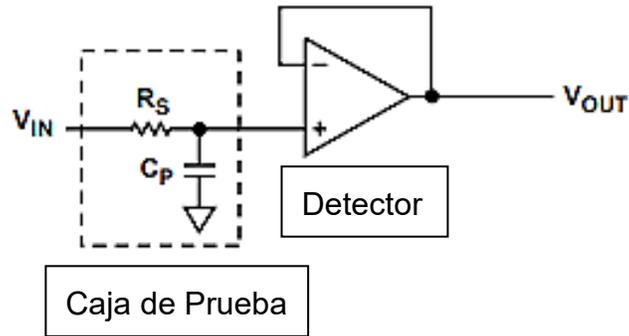
### 6.1.6 Métodos de Medición de Capacitancia de Entrada del Detector

Antes de describir los métodos se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Hay que tener en cuenta que la caja de pruebas se debe realizar aislándola para evitar que entre en contacto con superficies que modifiquen la medición.
2. Antes de realizar la medición, debe cerrarse la tapa con los tornillos correspondientes para evitar que las perturbaciones entren en la caja, ya que esta es equivalente a una jaula de Faraday.

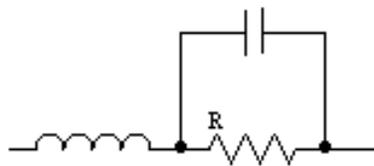
#### 6.1.6.1 1er Método: Medición de Capacitancia de Entrada con RS Serie de Prueba

Para este método, se utiliza la frecuencia del polo formado por la capacitancia de entrada  $C_P$  y la resistencia de valor conocido  $R_S$ , colocada a la entrada del amplificador. Se conecta la entrada del detector, a través de un cable triaxial, con la conexión correcta (conductor central es la señal, medio es la guarda y externo es la tierra), a la caja de pruebas. Luego la caja de prueba que contiene las resistencias al generador de señales. La salida del detector se conecta directamente al osciloscopio. Esto se puede representar como:



La caja de prueba que contiene la resistencia  $R_s$  se utiliza para realizar la medición y obtener la capacitancia de entrada equivalente del sistema. La  $R_s$  misma está compuesta por 4 resistencias en serie de 2,2 [M $\Omega$ ], esto quiere decir que el valor de  $R_s$  es de 8,8 [M $\Omega$ ]. Esta configuración de resistencia proporciona que la capacitancia parasita total de la caja de prueba disminuya y no afecte a la medición total; esto sucede ya que al poner en serie las resistencias, las capacitancias parasitas internas de las mismas tomadas como una capacitancia equivalente disminuye.

Esto último se puede ver de la siguiente manera:



Una resistencia de carbón o de metal puede representarse por el circuito equivalente de la imagen anterior. Si se pusieran en serie varias resistencias, la capacidad que se encuentra en paralelo con la  $R$  se podrían combinar en una capacidad equivalente  $C$  calculada como:



$$C_T = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Dando como resultado una capacitancia menor a la que se tenía si fuera una única capacitancia.



Luego de esto, colocamos el generador a  $V_{IN}$  1[KHz], para una salida de 1[V] pico a pico, utilizando una señal sinusoidal pura. Se varía la frecuencia de entrada hasta ver que a la salida  $V_{OUT}$  decaiga un factor de  $\sqrt{2}$ . En este punto, la frecuencia de la señal de entrada a -3 [dB] se calcula como:

$$f_{-3[dB]} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_S \cdot C_P}$$

Como la frecuencia ya la tenemos a través del generador, se despeja la incógnita  $C_P$ :

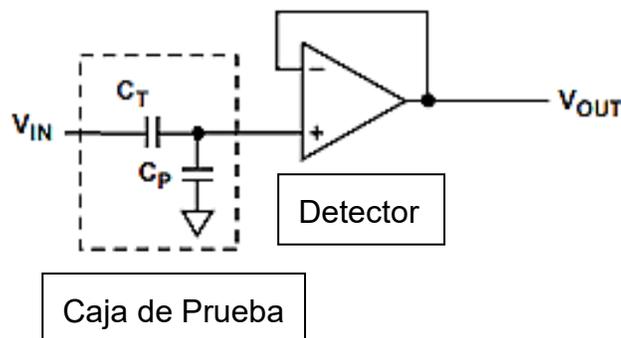
$$C_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_S \cdot f_{-3[dB]}}$$

Con este método ya podemos calcular fácilmente la capacitancia de entrada.

### 6.1.6.2 2do Método: Medición de Capacitancia de Entrada con CT de Prueba

En este caso, se utiliza una capacitancia de prueba conocida en la entrada que sea estable y de buena calidad. Esta capacitancia de prueba  $C_T$  puede ser de un valor alrededor de 10[pF] o 20[pF], y debe estar dentro de una caja de prueba como en el caso del “1er Método” y conectado con conector triaxial al detector. Un generador de señales se conecta a la caja de pruebas con una entrada  $V_{IN}$  de señal sinusoidal pura a 1 [V] pico a pico y 1 [KHz], medimos a la salida  $V_{OUT}$  del amplificador con el osciloscopio.

El esquemático del circuito es el siguiente:



La función de transferencia se puede calcular como:



$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{C_T}{C_P + C_T}$$

Despejando de la ecuación la incógnita CP:

$$C_P = \frac{C_T \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{OUT}}$$

En este método podemos ver que todo depende de la capacitancia que pongamos de prueba, por lo que mientras más exacta y estable sea, más cercano será el valor de capacitancia de entrada a la realidad.

## 6.1.7 Contrastación y Calibración

Esta etapa del proyecto fue desarrollada, con instrumentos calibrados, en el instituto ThEFI (Thüringer Energieforschungsinstitut), laboratorio ZET (Zentrum für Energietechnik), que se encuentra dentro de las instalaciones de la Technische Universität Ilmenau, Alemania.

Se realizaron distintas etapas de mediciones, pruebas y procedimientos, corroborando algunas hipótesis y eliminando otras. Esto resulta en un resumen estadístico que permite obtener los valores de las variables buscadas y los procedimientos necesarios para llevar a cabo las mediciones con el prototipo.

### 6.1.7.1 Instrumentación



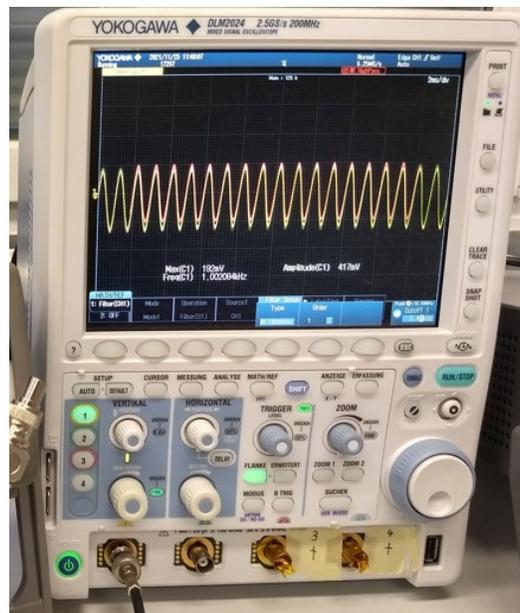


En esta etapa se utilizaron, no siempre simultáneamente, los siguientes instrumentos:

YOKOGAWA DLM 2024 Mixed Signal Oscilloscope:

- Ancho de Banda: 200 [MHz]
- 4 canales analógicos o 3 canales + 8 bit lógicos
- Frecuencia de muestreo máxima: 2.5 [GS/s]
- Impedancia de entrada: 1 [M $\Omega$ ] a 150 Vrsm máx. o 50[ $\Omega$ ] a 5 Vrsm máx.
- Rango de tiempo por división: 1 [ns/div] a 500 [s/div]
- Rango de tensión por división: 2 [mV/div] a 10 [V/div]
- A/D resolución: 8bit (25 [LSB/div]) máx. 12bit (utilizando High Resolution mode)

También se utilizaron las funciones matemáticas de filtrado para algunas mediciones.



KEITHLEY 6517B Electrometer/High Resistance Meter:

- Medición de resistencia máxima:  $10^{18}$  [ $\Omega$ ]
- Resolución de medición de corriente: 10 [aA] ( $10 \times 10^{-18}$  [A])
- Corriente bias de entrada:  $<3$  [fA]
- dígitos en modo de medición de alta resolución:  $6\frac{1}{2}$
- Tensión de carga en los rangos de corriente más bajos:  $<20$  [ $\mu$ V]



- Medición de voltaje máximo: 200 [V] con impedancia de entrada >200 [TΩ]
- Fuente de voltaje interna:  $\pm 1000$  [V]
- Culombímetro: de 1 [fC] a 2 [ $\mu$ C]

Este equipo consta de accesorios para realizar las mediciones, como conectores triaxiales de alta calidad, módulos y otras conexiones para aplicaciones como medición de alta tensión y resistencias de alta magnitud.



Este instrumento fue utilizado para medir distintas magnitudes, por lo que se muestra a continuación las tablas correspondientes:

### Culombímetro

Range	6½-Digit Resolution	Accuracy (1 Year) <sup>1,2</sup> 18°–28°C, $\pm$ (% + offset)	Temperature Coefficient 0°–18°C & 28°–50°C $\pm$ (% + offset)/°C
2 nC	1 fC	0.4 + 50 fC	0.04 + 30 fC
20 nC	10 fC	0.4 + 500 fC	0.04 + 100 fC
200 nC	100 fC	0.4 + 5 pC	0.04 + 1 pC
2 $\mu$ C	1 pC	0.4 + 50 pC	0.04 + 10 pC

### Voltímetro

Range	6½-Digit Resolution	Accuracy (1 Year) <sup>1</sup> 18°–28°C $\pm$ (% + offset)	Temperature Coefficient 0°–18°C & 28°–50°C $\pm$ (% + offset)/°C
2 V	1 $\mu$ V	0.025 + 40 $\mu$ V	0.003 + 20 $\mu$ V
20 V	10 $\mu$ V	0.025 + 300 $\mu$ V	0.002 + 100 $\mu$ V
200 V	100 $\mu$ V	0.06 + 3 mV	0.002 + 1 mV

La utilización del instrumento se explica durante las pruebas pertinentes.



### 33120A Function/Arbitrary Waveform Generator:

- Seno y onda cuadrada de 15 [MHz]
- Ondas disponibles: seno, triangular, cuadrada, rampa, ruido y otros
- 12-bit, 40 [MSa/s]; para señales arbitrarias: 16000 puntos
- Excelente estabilidad para señales digitales arbitrarias
- Resolución: 10 dígitos
- Impedancia de salida: 50 [ $\Omega$ ] BNC
- Modulación AM, FM y FSK



### U1730C Series Handheld LCR Meters:

- Resolución de cuentas: 20000
- Precisión: 0.2%
- Ancho rango LCR con 5 frecuencias de prueba hasta 100 [KHz]



- Auto identificación (Ai) automática determina y muestra el tipo de componente
- Función de análisis de componente: DCR, ESR, Z, D, Q, y  $\theta$
- Conectividad para conexión PC: IR-to-USB

La medición de LCR puede ser automática o manual, y se determina los rangos permitidos, para nuestro caso:

## Resistencia

Range	Resolution	U1731C/U1732C/U1733C			U1732C/U1733C		U1733C
		100 Hz	120 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	DCR <sup>1</sup>
2 $\Omega$ <sup>1</sup>	0.0001 $\Omega$	0.7% + 50	0.7% + 50	0.7% + 50	0.7% + 50	1.0% + 50	0.7% + 50
20 $\Omega$ <sup>1</sup>	0.001 $\Omega$	0.7% + 8	0.7% + 8	0.7% + 8	0.7% + 8	0.7% + 8	0.7% + 8
200 $\Omega$ <sup>1</sup>	0.01 $\Omega$	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.5% + 5	0.2% + 3
2000 $\Omega$	0.1 $\Omega$	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.5% + 5	0.2% + 3
20 k $\Omega$	0.001 k $\Omega$	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.5% + 5	0.2% + 3
200 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$	0.5% + 5	0.5% + 5	0.5% + 5	0.5% + 5	0.7% + 8	0.5% + 5
2000 k $\Omega$	0.1 k $\Omega$	0.5% + 5	0.5% + 5	0.5% + 5	0.7% + 5	NA	0.5% + 5
20 M $\Omega$	0.001 M $\Omega$	2.0% + 8	2.0% + 8	2.0% + 8	5.0% + 8	NA	2.0% + 8
200 M $\Omega$	0.01 M $\Omega$	6.0% + 80	6.0% + 80	6.0% + 80	NA	NA	6.0% + 80

## Capacitancia

Range	Resolution	U1731C/U1732C/U1733C			U1732C/U1733C	U1733C
		100 Hz	120 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
20 mF	0.001 mF	0.5% + 8	0.5% + 8	NA	NA	NA
2000 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F	0.5% + 5	0.5% + 5	0.5% + 8	NA	NA
200 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F	0.3% + 3	0.3% + 3	0.5% + 5	0.5% + 8	NA
20 $\mu$ F	0.001 $\mu$ F	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.5% + 5	5.0% + 10
2000 nF	0.1 nF	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.7% + 10
200 nF	0.01 nF	0.2% + 3	0.2% + 3	0.2% + 3	0.5% + 3	0.7% + 10
20 nF	0.001 nF	0.5% + 5	0.5% + 5	0.2% + 3	0.5% + 3	0.7% + 10
2000 pF <sup>1</sup>	0.1 pF	0.5% + 10	0.5% + 10	0.5% + 5	0.5% + 3	2.0% + 10
200 pF <sup>1</sup>	0.01 pF	NA	NA	0.5% + 10	0.8% + 10	2.0% + 10
20 pF <sup>1</sup>	0.001 pF	NA	NA	NA	1.0% + 20	2.5% + 10



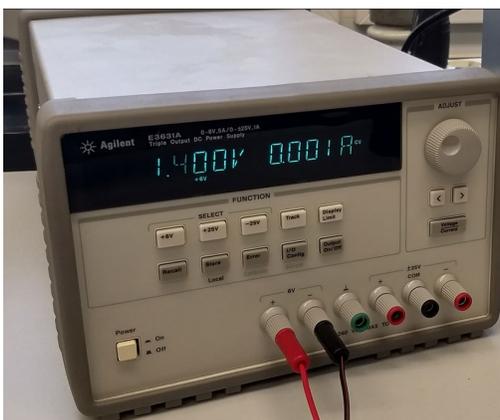
AGILENT E363xA Series Programmable DC Power Supplies

Model Number	E3631A		
	1	2	3
<b>DC output</b> Rating (0 to 40 °C)	0 to +6 V, 0 to 5 A	0 to +25 V, 0 to 1 A	0 to -25 V, 0 to 1 A
<b>Load regulation</b> ± (% of output + offset)			
<b>Line regulation</b> ± (% of output + offset)			
<b>Ripple and noise</b> (20 Hz to 20 MHz)			
Normal mode voltage	< 350 $\mu$ Vrms/2 mVpp		
Normal mode current	< 2 mArms	< 500 $\mu$ Arms	
<b>Accuracy<sup>1</sup> 12 months</b> (25 °C + 5 °C), ± (% output + offset)			
Programming			
Voltage	0.1% + 5 mV	0.05% + 20 mV	
Current	0.2% + 10 mA	0.15% + 4 mA	
Readback <sup>2</sup>			
Voltage	0.1% + 5 mV	0.05% + 10 mV	
Current	0.2% + 10 mA	0.15% + 4 mA	
<b>Resolution</b>			
Program	0.5 mV/0.5 mA	1.5 mV/0.1 mA	
Readback	0.5 mV/0.5 mA	1.5 mV/0.1 mA	
Meter	1 mV/1 mA	10 mV/1 mA	



Esta fuente de salida triple de 80 vatios ofrece tres salidas independientes: 0 a 6 V/5A, 0 a +25V/1A y 0 a -25V/1A. La salida de 6 V está aislada eléctricamente de los  $\pm 25$  V fuente de alimentación para minimizar cualquier interferencia entre los circuitos bajo prueba. Las salidas de  $\pm 25$  V pueden configurarse para rastrearse entre sí. Tiene excelente regulación y bajo ruido. También cuenta con comunicación GPIB y RS-232. Puede guardar y llamar funciones configuradas.

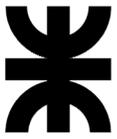
Las características óptimas que se muestran para nuestra aplicación permite ser utilizada para realizar pruebas de linealidad y carga de muestras capacitivas para posterior contrastación.



### 6.1.7.2 Medición de Capacitancia y Resistencia de Materiales

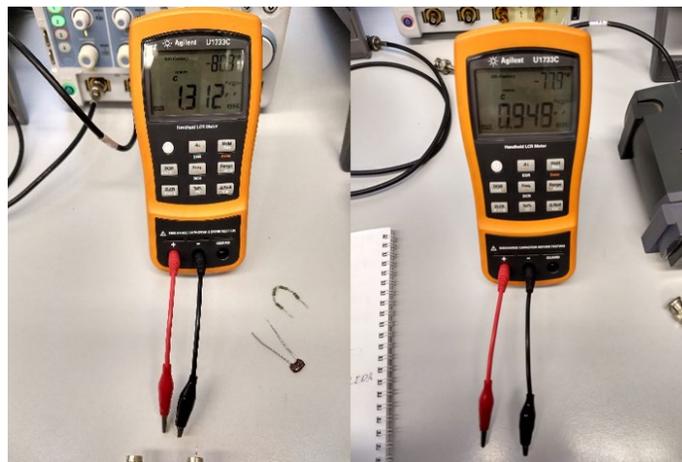
En esta sección se muestran los resultados de las mediciones realizadas para caracterizar los elementos que se utilizarán para la contratación y calibración del detector. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Mediciones de capacitancia	Resultado en [pF]
Puntas Medidor LCR	0,06
Puntas abiertas	0,949
Puntas cerradas	1,312
<b>Jaula Corto Circuito</b>	
Coaxial	7,123
Triaxial	6,877
<b>Jaula con la R</b>	
Coaxial	4,903
Triaxial	5,179
<b>Capacitancias</b>	
10 [pF]	9,979
20 [pF]	20,5

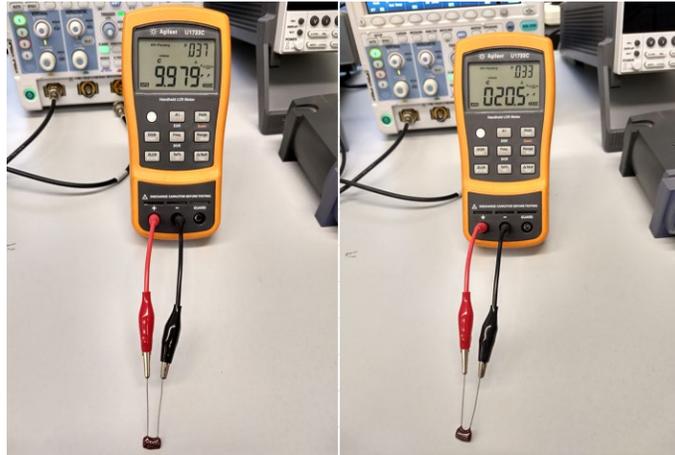


<b>Jaula con C=10</b>	
Coaxial	7,12
Triaxial	6,861
<b>Jaula con C=20</b>	
Coaxial	7,573
Triaxial	5,183
<b>Puntas de prueba - Conectores</b>	
Puntas cortas	34,2
Puntas largas	91,35
Puntas adaptadoras (ficha)	3,108
Cable largo de Keithley + Adaptador	206,7
<b>Copas</b>	
Coaxial (En LEMD 17)	16,94
Triaxial (En LEMD 16,6)	16,78
<b>Mediciones de resistencia</b>	
<b>Resultado en [<math>\Omega</math>]</b>	
<b>Resistencia serie</b>	8810000

Como ejemplo se ilustran algunas imágenes de las mediciones realizadas. Las siguientes 2 imágenes son de la capacitancia de las puntas del medidor de LCR en las posiciones específicas utilizadas luego para medir los demás elementos. Esto es importante ya que se debe colocar en cero el medidor para que no agregue su propia capacitancia a la medición, o sea, que no modifique el valor real.



Las siguientes dos imágenes son de las mediciones de las capacitancias utilizadas para realizar las pruebas:



La siguiente imagen es de la medición de la ficha adaptadora de triaxial a coaxial:



La medición de las copas se realizó de la misma manera. Un ejemplo es la siguiente imagen de la copa utilizada para cable coaxial:





### 6.1.7.3 Medición de Capacitancia de Entrada del Sistema

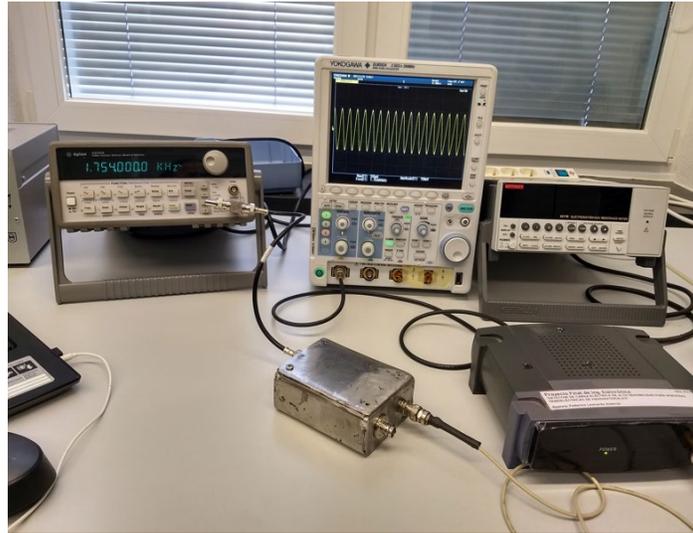
Para realizar la medición de capacitancia de entrada del sistema, se utilizan los dos métodos especificados anteriormente. A continuación, se muestra el resultado de la medición con resistencias para el caso de conexión coaxial y triaxial de la caja de prueba respectivamente:

$$C_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_S \cdot f_{-3[dB]}}$$

<b>MEDICION DE CAPACITANCIA DE ENTRADA METODO RESISTIVO</b>	
<b>PRUEBA 1: R COAXIL</b>	
Vpp generador [V]	1,412
Vpp osciloscopio [V]	1
f [kHz]	1
f3db [kHz]	1,754
C [pF]	10,2995
<b>PRUEBA 1: R TRIAXIAL</b>	
V generador [V]	1,279
V osciloscopio [V]	1
f [kHz]	1
f3db [kHz]	1,933
C [pF]	9,3457

El valor de C obtenido para ambas conexiones difiere aproximadamente 1[pF]. Esto puede deberse al error cometido durante la medición de tensión, ya que el ruido de fondo genera incertidumbre en la visualización y medición a través de cursores, de modo que los dígitos después de la coma cambian constantemente en función del ruido. Esto afecta también a la frecuencia f3db tomada para el cálculo. Para disminuir el error al momento de la adquisición del valor, se toma un valor promedio para acercarnos al valor real, suponiendo que está siendo afectado por ruido blanco.

En la siguiente imagen se ve un ejemplo de la medición de conector coaxial, utilizando el adaptador:



Para el caso de la medición a través del método capacitivo, se utilizaron 2 capacidades, una de 10 [pF] y otra de 20 [pF]. Estas capacitancias de referencias, que fueron medidas en la sección anterior, son capacitancias con especificaciones militares (DM-15), lo que asegura que son muy estables ante vibraciones, golpes, y cambios de temperatura. Por lo que es óptimo para las pruebas, ya que a pesar del cambio de las condiciones, podremos tener una capacitancia estable, para ser utilizada como referencia. Estas dos capacidades de mica provienen de un kit del laboratorio LEMD (DM-15 Capacitor Kit “ELMENCO”).

Se aplica la formula ya vista para realizar el cálculo:

$$C_P = \frac{C_T \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{OUT}}$$

En la siguiente tabla se observa los resultados obtenidos:



<b>MEDICION DE CAPACITANCIA DE ENTRADA METODO CAPACITIVO</b>	
<b>PRUEBA 1: C=10 [pF] COAXIAL</b>	
Vpp generador [V]	1
Vpp osciloscopio [V]	0,4
C [pF]	14,9685
<b>PRUEBA 1: C=10 [pF] TRIAXIAL</b>	
Vpp generador [V]	1
Vpp osciloscopio [V]	0,462
C [pF]	11,6206
<b>PRUEBA 1: C=20 [pF] COAXIAL</b>	
Vpp generador [V]	1
Vpp osciloscopio [V]	0,57
C [pF]	15,4649
<b>PRUEBA 1: C=20 [pF] TRIAXIAL</b>	
Vpp generador [V]	1
Vpp osciloscopio [V]	0,629
C [pF]	12,0914

Los valores resaltados en amarillo se utilizarán como referencia para posterior contrastación. Estos valores, a partir de ahora, serán llamados:  $C_{INmin} = 11,6206$  [pF] y  $C_{INmax} = 12,0914$  [pF]. Acá vemos que los resultados de  $C_{IN}$  varían para cada prueba, con cada capacitor patrón. Esto sucede por la variación de la tensión al momento de la adquisición a través del osciloscopio, ya que el ruido interfiere y modifica los valores. Por esto tomamos dos valores como máximo y mínimo, de la copa que se utilizará, y se calcula a partir de estos los demás valores.

A parte de la adquisición de estos valores, se probó utilizar un filtro digital para poder adquirir los valores de tensión con menos fluctuación. Se utilizó un filtro IRR de segundo orden, pero esto ocasionó que la tensión medida disminuyera, por lo que aumenta considerablemente la capacitancia calculada. Este resultado se adjunta, pero no se utiliza:



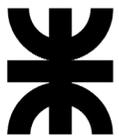
<b>MEDICION DE CAPACITANCIA DE ENTRADA METODO CAPACITIVO CON FILTRO</b>	
<b>PRUEBA 1: C=10 [pF] COAXIAL</b>	
Vpp osciloscopio [V]	0,36
C [pF]	17,7404
<b>PRUEBA 1: C=20 [pF] COAXIAL</b>	
Vpp osciloscopio [V]	0,497
C [pF]	20,7475

#### 6.1.7.4 Prueba de Linealidad de la Tensión

Teniendo en cuenta que el detector da como valor de salida una tensión, se busca contrastarlo con los instrumentos disponibles en el laboratorio. Utilizamos el electrómetro KEITHLEY 6517B funcionando como voltímetro, de modo que obtenemos el resultado sobre su pantalla, y a su vez, se utiliza el osciloscopio YOKOGAWA DLM 2024 para poder visualizar el valor obtenido desde el detector y el valor medido de la fuente de tensión de referencia AGILENT E3631A.

En la siguiente tabla se muestra las mediciones realizadas para distintos valores positivos y negativos de tensión, configurando la fuente de tensión y midiendo en el osciloscopio. Luego se realizó la adquisición a través del filtrado digital mencionado anteriormente. Después se conectó el electrómetro KEITHLEY para ser utilizado como voltímetro, a través de la copa coaxial, documentando los resultados para los mismos valores; y finalmente se realiza la conexión del prototipo detector, tomando los valores mostrados en el osciloscopio y los obtenidos mediante el filtrado digital. Algo a destacar es que se utiliza la copa coaxial en un principio y luego la triaxial, pero ya que ambos resultados fueron similares, se adjuntó la primera. Además, los valores de tensión muestreados fueron elegidos de forma exponencial, esto quiere decir, que a medida que nos acercamos al cero, utilizamos valores cada vez más cercanos entre sí, y a medida que nos alejamos, los saltos de los valores fueron mayores.

Se debe tener en cuenta que los valores en rojo, al ser de tan baja magnitud, fueron afectadas por el ruido, por lo que se toma directamente la tensión media y no máxima del osciloscopio. El osciloscopio fue configurado también con un filtrado digital utilizado es un filtro IRR 2° a 25Hz y la base de tiempo utilizada fue de 10 [ms/div]. Para la medición realizada con el electrómetro KEITHLEY se utilizó la función de “relación”, para configurar el “cero” real a través de un cortocircuito realizado con una conexión.



V. de Fuente (Pantalla) [V]	V. de Fuente en Osc. [V]	V. de Fuente en Osc. con Filtro [V]	V. del Detector en Osc. [V]	V. del Detector en Osc. con Filtro [V]	V. de KEITHLEY (Pantalla) [V]	[V/div] del Osc. [V]
-2,4	-2,35	-2,4	-2,28	-2,4	-2,3985	1v
-2,3	-2,23	-2,29	-2,16	-2,29	-2,2985	1v
-2,2	-2,18	-2,19	-2,1	-2,19	-2,1983	1v
-2,1	-2,05	-2,09	-1,98	-2,09	-2,0983	1v
-2	-1,96	-1,99	-1,96	-1,995	-1,99924	500mv
-1,8	-1,76	-1,79	-1,76	-1,795	-1,7992	500mv
-1,6	-1,56	-1,59	-1,56	-1,593	-1,59905	500mv
-1,4	-1,36	-1,39	-1,36	-1,394	-1,39887	500mv
-1,2	-1,16	-1,19	-1,16	-1,193	-1,1991	500mv
-1	-0,96	-0,99	-0,99	-0,991	-0,9989	500mv
-0,8	-0,777	-0,797	-0,77	-0,798	-0,79953	200mv
-0,6	-0,58	-0,598	-0,58	-0,599	-0,5998	200mv
-0,4	-0,384	-0,399	-0,385	-0,399	-0,399965	100mv
-0,2	-0,19	-0,198	-0,192	-0,199	-0,19947	50mv
-0,1	-0,09	-0,099	-0,092	-0,099	-0,09969	50mv
-0,08	-0,071	-0,0792	-0,073	-0,0795	-0,07964	20mv
-0,06	-0,051	-0,0595	-0,053	-0,0598	-0,05987	20mv
-0,04	-0,032	-0,0396	-0,033	-0,0397	-0,03986	10mv
-0,02	-0,0196	-0,0196	-0,019	-0,0197	-0,0198	5mv
-0,01	-0,0093	-0,0093	-0,0094	-0,0095	-0,00979	5mv
-0,005	-0,0046	-0,0046	-0,0047	-0,0048	-0,00479	2mv
-0,004	-0,0035	-0,0036	-0,0037	-0,0037	-0,00363	2mv
-0,003	-0,0027	0,0027	-0,0028	-0,0028	-0,00282	2mv
-0,002	-0,0017	-0,0016	-0,0017	-0,0017	-0,0017	2mv
-0,001	-0,0008	0,0008	-0,0009	-0,0009	-0,00087	2mv
0	0,16 (0,00002)	0,00001	0,0013 (-0,00005)	-0,00005	Con REL 0 Sin REL 0,00004	2mv
0,001	0,0007	0,0009	0,0008	0,0009	0,00084	2mv
0,002	0,0016	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	2mv
0,003	0,0027	0,0028	0,0027	0,0028	0,00282	2mv
0,004	0,0035	0,0036	0,0035	0,0037	0,00365	2mv
0,005	0,0046	0,0046	0,0046	0,0048	0,00477	2mv
0,01	0,0094	0,0095	0,0095	0,0096	0,00982	5mv
0,02	0,0196	0,0197	0,0195	0,0197	0,01983	5mv



0,04	0,045	0,0396	0,043	0,0397	0,0399	10mv
0,06	0,066	0,0596	0,063	0,0598	0,05995	20mv
0,08	0,085	0,0792	0,083	0,0793	0,0797	20mv
0,1	0,106	0,099	0,104	0,099	0,09976	50mv
0,2	0,206	0,198	0,204	0,199	0,19957	50mv
0,4	0,408	0,396	0,411	0,397	0,39975	100mv
0,6	0,616	0,597	0,616	0,598	0,59995	200mv
0,8	0,815	0,794	0,816	0,796	0,79967	200mv
1	1,02	0,991	1,02	0,993	0,99907	500mv
1,2	1,23	1,194	1,23	1,194	1,1993	500mv
1,4	1,42	1,39	1,42	1,395	1,39907	500mv
1,6	1,64	1,59	1,62	1,596	1,59925	500mv
1,8	1,84	1,79	1,84	1,796	1,79856	500mv
2	2,02	1,99	2,02	1,988	1,99833	500mv
2,1	2,1	2,07	2,2	2,08	2,0984	1v
2,2	2,23	2,17	2,28	2,17	2,1984	1v
2,3	2,28	2,27	2,35	2,21	2,2986	1v
2,4	2,36	2,38	2,35	2,22	2,3986	1v

Antes de comparar los valores a través del análisis de errores, se debe aclarar que el ruido afecta fuertemente las mediciones cercanas a cero, sumado a que el osciloscopio tiene ruido interno, por lo que el error aumentará en las mediciones con osciloscopio, si no es atenuado con una jaula de Faraday.

La siguiente tabla muestra el error relativo porcentual respecto a los distintos valores tomados de la tabla anterior.

	Error relativo% de			
V. de Referencia de Fuente	V. Osc. Respecto de Fuente	V. Osc. con Filtro respecto de Fuente	V. Detector Respecto de KEITHLEY	V. Detector con Filtro Respecto de KEITHLEY
-2,4	-2,083	0	-4,941	0,063
-2,3	-3,043	-0,435	-6,026	-0,37
-2,2	-0,909	-0,455	-4,472	-0,378
-2,1	-2,381	-0,476	-5,638	-0,396
-2	-2	-0,5	-1,963	-0,212
-1,8	-2,222	-0,556	-2,179	-0,233
-1,6	-2,5	-0,625	-2,442	-0,378
-1,4	-2,857	-0,714	-2,779	-0,348

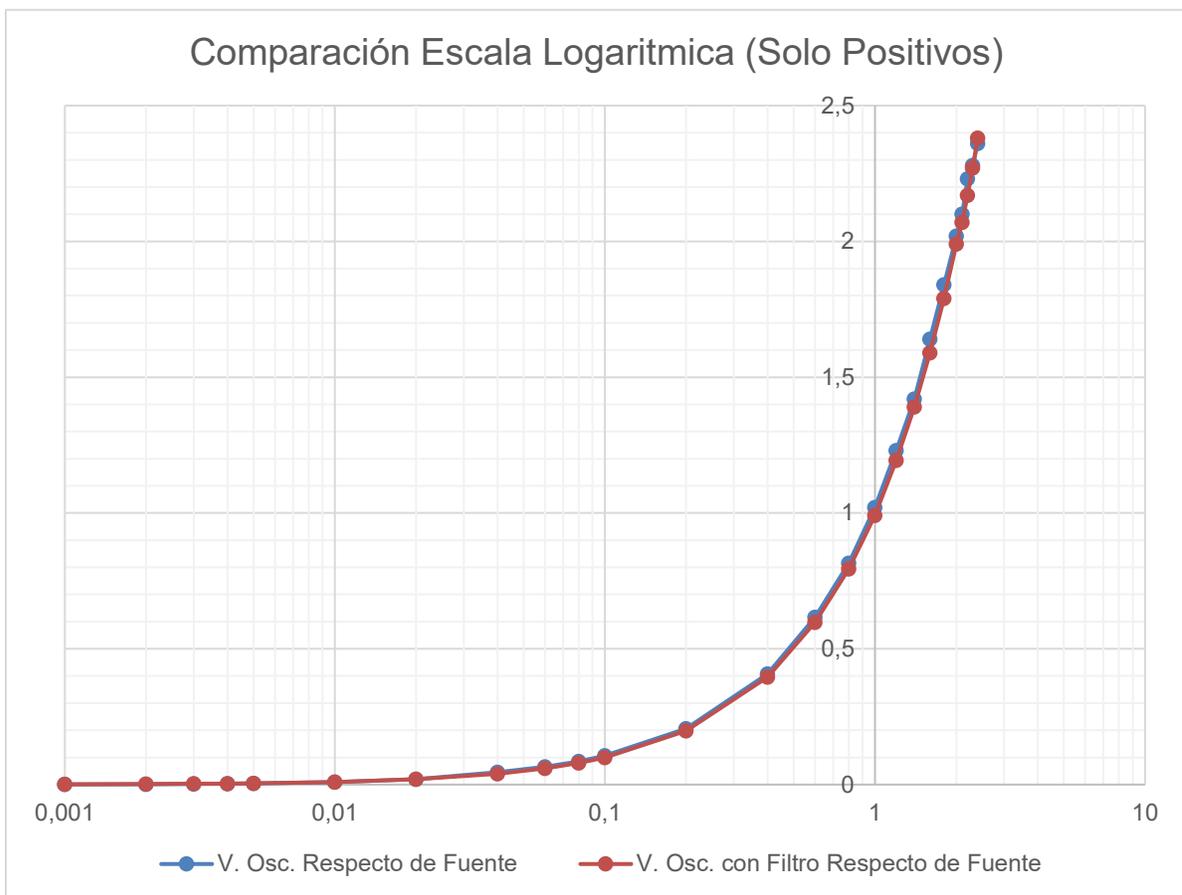


-1,2	-3,333	-0,833	-3,261	-0,509
-1	-4	-1	-0,891	-0,791
-0,8	-2,875	-0,375	-3,693	-0,191
-0,6	-3,333	-0,333	-3,301	-0,133
-0,4	-4	-0,25	-3,742	-0,241
-0,2	-5	-1	-3,745	-0,236
-0,1	-10	-1	-7,714	-0,692
-0,08	-11,25	-1	-8,338	-0,176
-0,06	-15	-0,833	-11,475	-0,117
-0,04	-20	-1	-17,21	-0,401
-0,02	-2	-2	-4,04	-0,505
-0,01	-7	-7	-3,984	-2,962
-0,005	-8	-8	-1,879	0,209
-0,004	-12,5	-10	1,928	1,928
-0,003	-10	-10	-0,709	-0,709
-0,002	-15	-20	0	0
-0,001	-20	-20	3,448	3,448
0	0	0	0	0
0,001	-30	-10	-4,762	7,143
0,002	-20	-15	0	0
0,003	-10	-6,667	-4,255	-0,709
0,004	-12,5	-10	-4,11	1,37
0,005	-8	-8	-3,564	0,629
0,01	-6	-5	-3,259	-2,24
0,02	-2	-1,5	-1,664	-0,656
0,04	12,5	-1	7,769	-0,501
0,06	10	-0,667	5,088	-0,25
0,08	6,25	-1	4,141	-0,502
0,1	6	-1	4,25	-0,762
0,2	3	-1	2,22	-0,286
0,4	2	-1	2,814	-0,688
0,6	2,667	-0,5	2,675	-0,325
0,8	1,875	-0,75	2,042	-0,459
1	2	-0,9	2,095	-0,608
1,2	2,5	-0,5	2,56	-0,442
1,4	1,429	-0,714	1,496	-0,291
1,6	2,5	-0,625	1,297	-0,203
1,8	2,222	-0,556	2,304	-0,142
2	1	-0,5	1,084	-0,517

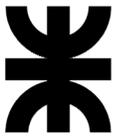


2,1	0	-1,429	4,842	-0,877
2,2	1,364	-1,364	3,712	-1,292
2,3	-0,87	-1,304	2,236	-3,855
2,4	-1,667	-0,833	-2,026	-7,446

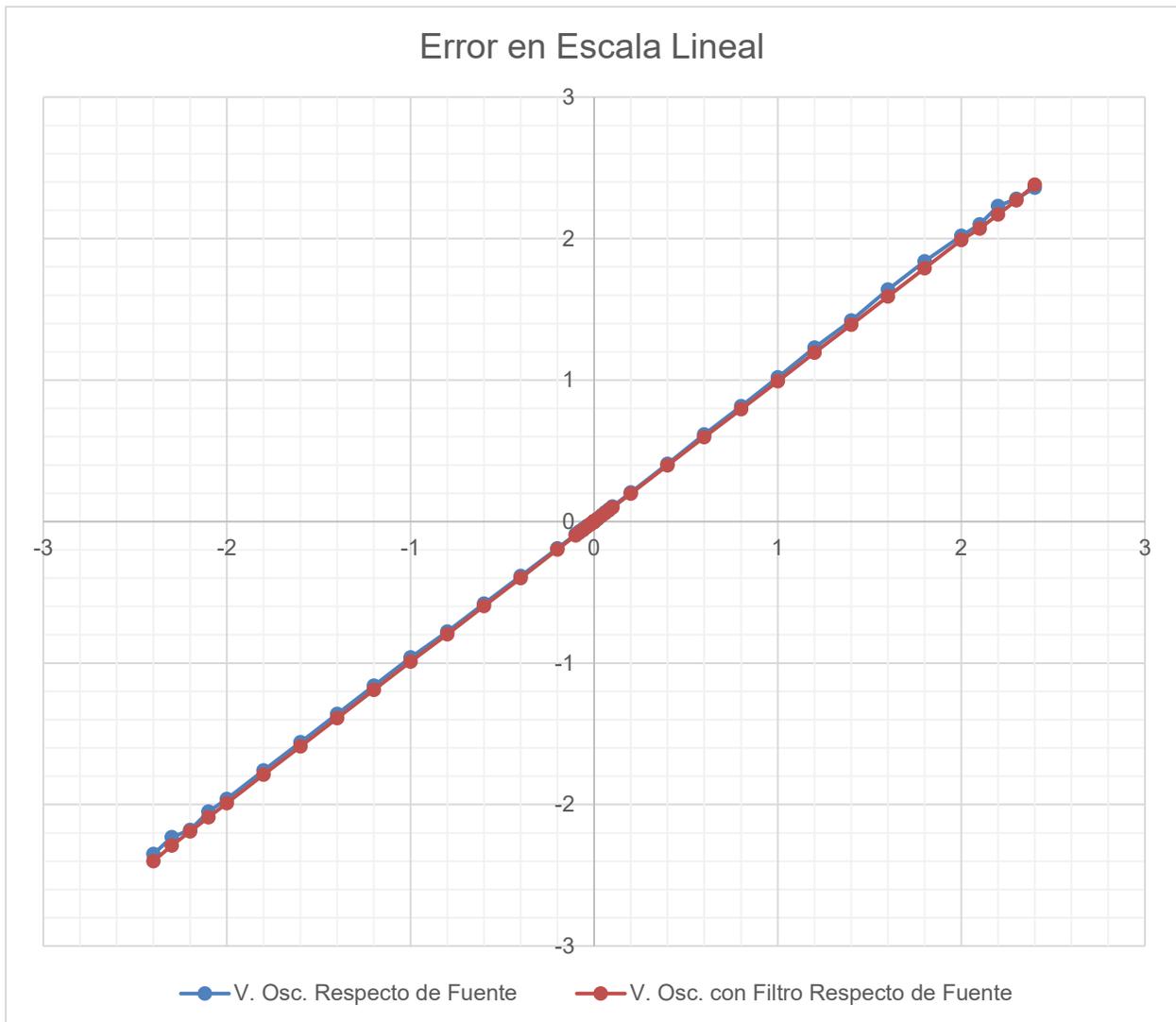
A continuación, se adjuntan gráficas para poder visualizar fácilmente toda la información. En las siguientes imágenes, el eje “x” representa la tensión ideal mostrada por la pantalla de la fuente y en el eje “y” se representa las mediciones realizadas o los errores relativos.



A través de la escala logarítmica se pueden apreciar mejor las muestras tomadas para valores muy pequeños. Se puede observar que, a simple vista, los valores son iguales, aunque si se observa con detenimiento la curva naranja está por debajo de la azul, esto quiere decir que los valores que fueron filtrados digitalmente perdieron amplitud respecto a los que no, aunque no es considerablemente grande la pérdida, pero mejora la estabilidad de la medición.



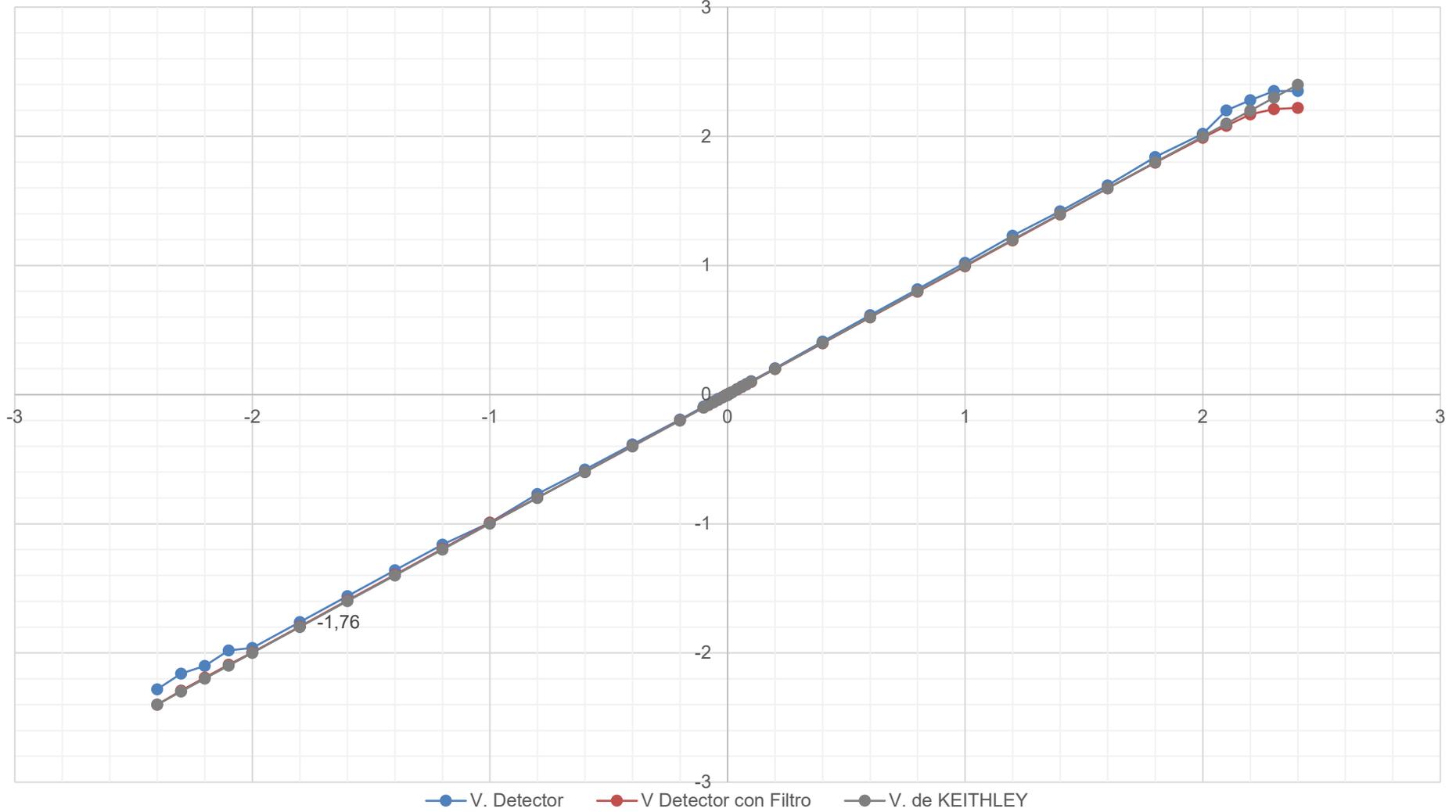
En la siguiente gráfica se muestra la misma información anterior, pero en escala lineal, por lo que se puede observar tanto la información positiva, como la negativa.



En la siguiente gráfica se observa la diferencia de las mediciones del detector, con y sin filtro, respecto al electrómetro KEITHLEY.



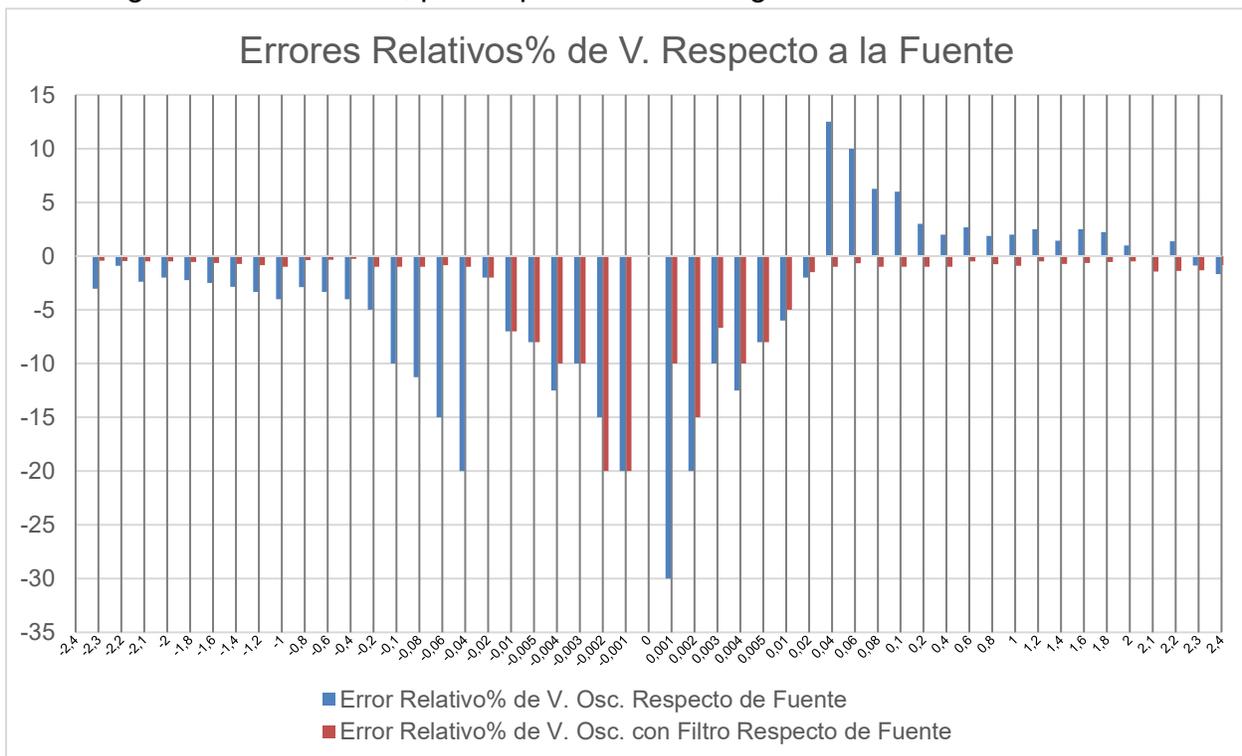
Error en Escala Lineal





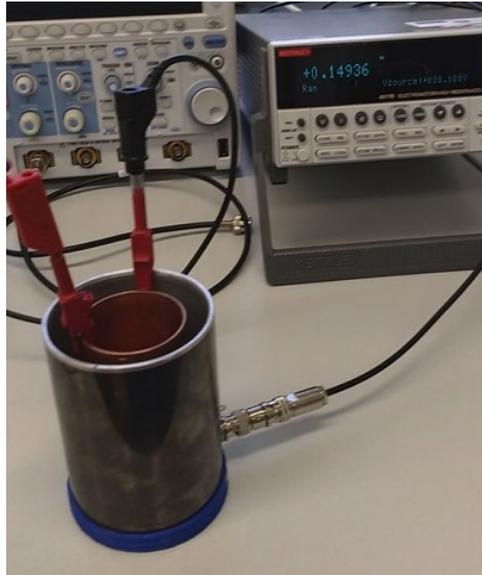
Se puede observar a simple vista que el error del detector desarrollado respecto al KEITHLEY es prácticamente nulo hasta los  $\pm 2$  [V], esto es porque el detector está limitado por el chip utilizado. Cuando observamos la gráfica, vemos que las mediciones con filtro coinciden directamente con el KEITHLEY, de modo que al suprimir el ruido podemos observar un resultado más claro. Esto es algo que el KEITHLEY también lo hace directamente por su propia configuración, donde permite promediar “x” cantidad de muestras en un tiempo determinado.

La siguiente gráfica se observa la diferencia entre los errores relativos porcentuales de la medición del osciloscopio, con y sin filtro, respecto a los valores mostrados por la pantalla de la fuente. Esto muestra que el osciloscopio y el ruido del ambiente afectan la medición, por lo que el uso del filtro mejora la adquisición, aunque una observación detenida muestra que con filtro el error es negativo y menor, esto es porque a pesar de que disminuya el ruido, atenúa un poco la magnitud de la tensión, por lo que se vuelve negativo.



Se observa, en general, que el error con filtrado es menor que sin filtrado, como ya se dijo anteriormente. Por otro lado, en la mayor parte de los valores el error se encuentra por debajo del 5% aunque a medida que nos acercamos al cero, aumenta fuertemente el error. Esto es causa del ruido, produciendo error al medir con el osciloscopio. Esto se puede va a impactar posteriormente al comparar el detector con el KEITHLEY.





A través de un video se explica cómo se configura el KEITHLEY para realizar las mediciones.

Se concluye finalmente que el detector es muy lineal dentro de los valores de trabajo del CI, y las mediciones pueden mejorarse utilizando una jaula de Faraday y una conexión a tierra más limpia o dedicada.

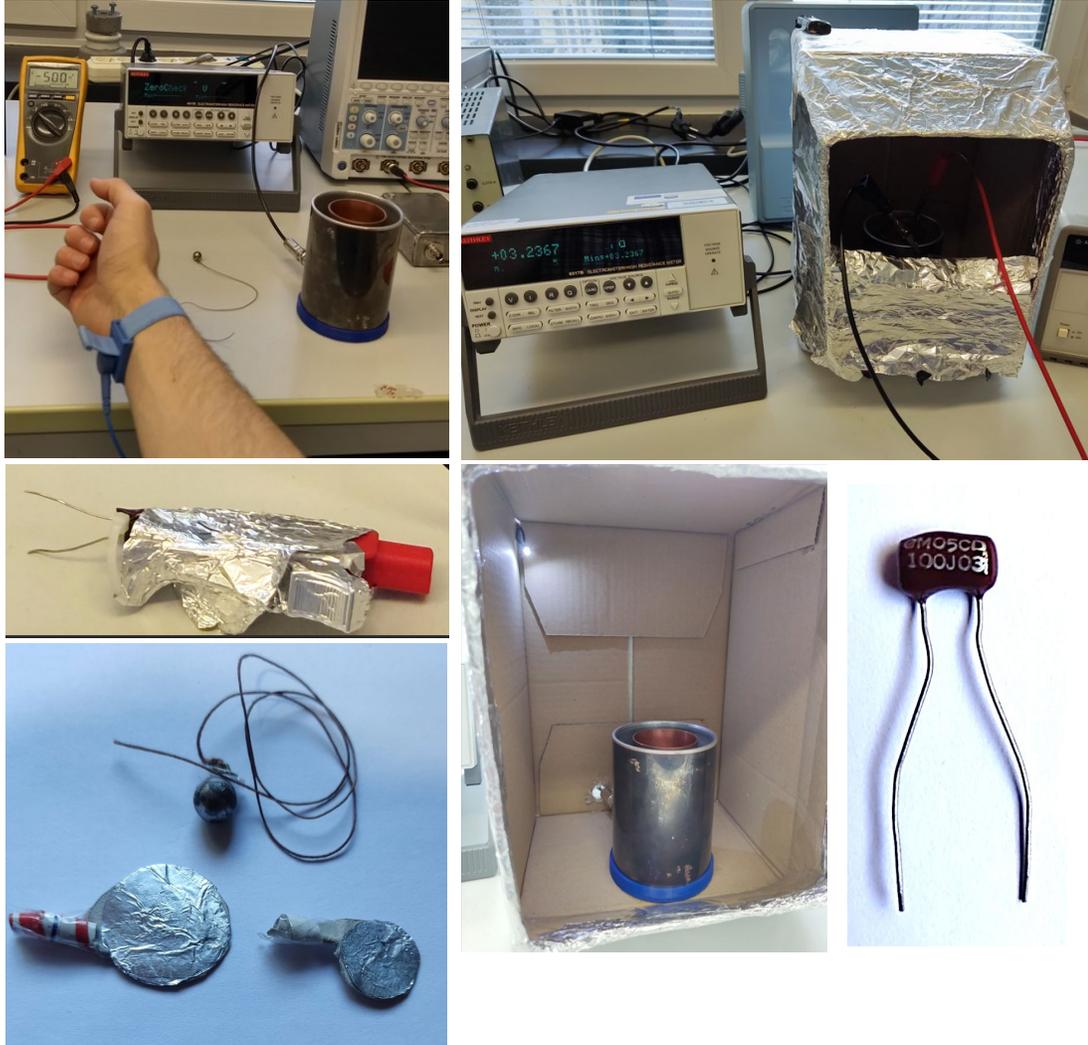
#### 6.1.7.5 Validación del Método – Contrastación y Calibración del Detector

En esta etapa final de pruebas, se realiza una validación del método propuesto para la obtención de la carga eléctrica de una muestra. Esta validación se realiza con el KEITHLEY, utilizándolo como voltímetro y culombímetro. Para esto, en un primer momento, se utilizaron como muestra planos de pruebas metalizados y esferas metálicas para ser cargadas a través de una fuente alta tensión, pero la mala aislación y el ruido hicieron imposible la posibilidad de realizar las mediciones de tensión y carga eléctrica de estas, por lo que se optó por volver a utilizar las capacitancias de referencias para esta etapa. Estas capacitancias permitieron mantener una tensión estable interna, ya que, al tener bajas pérdidas, no era afectaba la medición durante el tiempo de la medida, y no era perturbada por el ruido.

También, para el caso de la verificación y calibración, se debió construir una jaula de Faraday para realizar las mediciones con el detector, evitando las perturbaciones ambientales y mejorando la adquisición en gran medida. También se utilizó una pulsera antiestática para evitar perturbar las mediciones, ya que su magnitud era muy baja. En las siguientes imágenes se ilustra la pulsera utilizada, los planos de prueba que se intentaron utilizar en un primer momento, la capacidad



que se utilizó para la verificación (con su pinza antiestática) y la jaula de Faraday construida a partir de papel aluminio.



El procedimiento general realizado para la validación del método se realizó tanto para la copa coaxial, como para la triaxial. Los elementos fueron organizados de la siguiente manera: La copa de Faraday se colocó dentro de la jaula de Faraday improvisada, de modo que solo quedara una apertura para introducir el capacitor cargado, esta jaula fue aterrada, al mismo punto que la pulsera antiestática utilizada, la copa fue conectada a través de un orificio por el que atravesó el cable conectado al KEITHLEY. Configurando el KEITHLEY como voltímetro o culombímetro, agregando la configuración de guarda activa para el caso del triaxial y sin guarda activa para el caso coaxial, el método llevado a cabo fue el siguiente:

1. Se descarga el capacitor a través de un cortocircuito
2. Se descarga la copa a través de un cortocircuito



3. Se activa “Zero-Check” del KEITHLEY (reinician la medición descargando el circuito interno)
4. Se carga el capacitor con la tensión deseada durante 3 [s]
5. Se desactiva “Zero-Check” del KEITHLEY y rápidamente se apoya el extremo negativo del capacitor sobre el negativo de la copa (pared externa) y luego el extremo positivo sobre el positivo de la copa (pared interna)
6. Habiendo configurado el KEITHLEY para múltiples muestras con resultado en valor medio, se anota el valor leído, si es estable
7. Se repite desde el punto 1.

Teniendo en cuenta el método paso a paso, este procedimiento se realizó en principio para la copa coaxial. El capacitor utilizado fue el de 10 [pF] (medida es de 9,979 [pF]), se tomaron 3 valores de tensión diferentes: 0,5 [V], 1 [V] y 3 [V], para poder realizar 15 muestras de cada uno. Durante las mediciones, se descartaron los valores que mostraban comportamiento aleatorio, para no generar ruido en el cálculo estadístico ni desviaciones aleatorias. La verificación consta de tomar los valores de tensión del capacitor cargado con las tensiones descritas y luego tomar valores de carga eléctrica volviendo a cargar el capacitor con las mismas tensiones. Esto es porque no se puede tomar la tensión y la carga eléctrica a la vez, por lo que quiere decir que cada valor de tensión en la tabla no se corresponde directamente al valor de la carga contiguo.

Luego se realizaron los promedios para cada valor de tensión y carga para obtener el valor de capacitancia “total” representado por los promedios. Este valor de capacitancia es el valor total del sistema que está en funcionamiento. Hay que destacar que el KEITHLEY anula la capacidad interna, por lo que la capacitancia que entra en juego es la del capacitor, la copa y el cable.

Por otro lado, se calcula la capacitancia total teórica, de modo que se pueda calcular, con el promedio de las tensiones, el valor de carga teórico. Vemos que el valor de carga teórico es prácticamente igual al obtenido por medición directa, esto se aprecia mejor con el cálculo del error de carga relativo porcentual del calculado respecto al medido de forma directa.

Finalmente se obtiene, desagregando la capacitancia del sistema, la capacitancia de la muestra introducida, esto es, el capacitor. Esto se hace sustrayendo las capacidades del sistema al valor de capacitancia total calculado a través de las mediciones. Este resultado es muy cercano al valor de la capacitancia real. Luego de realizar el cálculo con las 3 tensiones elegidas, se realiza un promedio de las capacidades calculadas, a través de desagregar la capacitancia del sistema, y se obtiene el promedio de los errores cometidos al comparar la carga medida y la carga teórica.

La capacitancia del sistema, de forma teórica, es la suma de la copa coaxial, el cable, el adaptador y la capacitancia: 296,279 [pF]



Esta medición se realizó luego de haber armado el sistema dentro de la jaula de Faraday improvisada. Esto es importante ya que el plano de tierra generado por la jaula influye a la copa y el sistema en general. La capacitancia desagregada del sistema es la capacitancia total calculada anteriormente menos la capacitancia de la muestra (capacitor de 10 [pF]): 286,3 [pF].

Se define como  $Q_T$  "Q teórico" y  $Q_{Prom}$  "Q promedio".

V. Fuente	V. KEITHLEY [V]	Q. KEITHLEY [pC]	$V_{Prom}$ KEITHLEY [V]	$Q_{Prom}$ KEITHLEY [pC]	$C = V_{prom} * Q_{prom}$ [pF]	Cálculo del Q [pC]	Error Rel.% $Q_T$ resp. $Q_{Prom}$	Cap. de Muestra [pF]
0,5	0,038	11	0,0329	9,7867	298	9,7377	-0,5003	11,5
0,5	0,032	8						
0,5	0,037	8						
0,5	0,033	8						
0,5	0,031	8						
0,5	0,031	11						
0,5	0,023	11						
0,5	0,024	9						
0,5	0,032	11						
0,5	0,043	9						
0,5	0,042	10						
0,5	0,025	11						
0,5	0,033	9,8						
0,5	0,033	11						
0,5	0,036	11						
1	0,071	20	0,0648	19,1333	295	19,1989	0,3426	8,97
1	0,064	17						
1	0,079	17						
1	0,063	24						
1	0,063	17						
1	0,086	22						
1	0,056	23						
1	0,089	20						
1	0,055	21						
1	0,064	18						
1	0,049	18						
1	0,058	16						



1	0,056	18						
1	0,055	17						
1	0,064	19						
3	0,189	47						
3	0,16	49						
3	0,157	46						
3	0,161	50						
3	0,17	47						
3	0,165	59						
3	0,186	47						
3	0,193	45	0,1706	5,0467	296	50,5452	0,1556	9,52
3	0,163	61						
3	0,179	49						
3	0,175	51						
3	0,171	52						
3	0,147	51						
3	0,171	56						
3	0,172	47						

Obtenemos un promedio de la capacitancia muestra, por medio de desagregar la capacitancia del sistema teórico, igual a 9,984 [pF]. Este resultado es prácticamente igual al real medido (9,979 [pF]). La diferencia es de 0,005 [pF], de modo que se puede atribuir directamente al ruido del sistema y a las perturbaciones, y no al método. El promedio de los errores es de prácticamente 0%, por lo que podemos decir que la carga teórica y la carga calculada a través de las mediciones es la misma estadísticamente.

Ahora se realiza el mismo procedimiento, pero utilizando la copa triaxial. Se recalculan y miden los valores de capacitancia del sistema. El valor de la capacitancia muestra continúa siendo el mismo (9,979 [pF]). Se debe tener en cuenta que, dado que el sistema en sí elimina la capacidad del sistema antes de calcular la carga eléctrica, los valores de carga eléctrica se mantienen como dato, pero se mide nuevamente la tensión.

La capacitancia del sistema, de forma teórica, es la suma de la copa triaxial, y la capacitancia únicamente, ya que ahora la guarda esta activada. El valor es de: 26,76 [pF]. La capacitancia desagregada del sistema es la capacitancia total calculada anteriormente menos la capacitancia de la muestra, o sea, únicamente el de la copa: 16,78 [pF].



V. Fuente [V]	V. KEITHLEY [V]	Q. KEITHLEY [pC]	V <sub>Prom</sub> -KEITHLEY [V]	Q <sub>Prom</sub> -KEITHLEY [pC]	C = V <sub>prom</sub> * Q <sub>Prom</sub> [pF]	Cál. del Q <sub>T</sub> [pC]	Error Rel.% Q <sub>T</sub> resp. Q <sub>Prom</sub>	Cap. de Muestra [pF]
0,5	0,4	11	0,3813	9,7867	257	10,2045	4,2692	8,88
0,5	0,45	8						
0,5	0,3	8						
0,5	0,34	8						
0,5	0,4	8						
0,5	0,35	11						
0,5	0,46	11						
0,5	0,3	9						
0,5	0,38	11						
0,5	0,42	9						
0,5	0,38	10						
0,5	0,37	11						
0,5	0,36	9,8						
0,5	0,44	11						
0,5	0,37	11						
1	0,79	20	0,754	19,1333	254	20,177	5,4549	8,6
1	0,8	17						
1	0,72	17						
1	0,69	24						
1	0,86	17						
1	0,7	22						
1	0,72	23						
1	0,77	20						
1	0,7	21						
1	0,74	18						
1	0,8	18						
1	0,79	16						
1	0,8	18						
1	0,73	17						
1	0,7	19						
3	2	47	1,9553	5,0467	258	52,3247	3,6817	9,03
3	1,9	49						
3	1,89	46						
3	1,95	50						
3	2,15	47						
3	1,7	59						



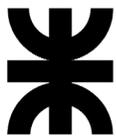
3	0,186	47						
3	0,193	45						
3	0,163	61						
3	0,179	49						
3	0,175	51						
3	0,171	52						
3	0,147	51						
3	0,171	56						
3	0,172	47						

Obtenemos un promedio de la capacitancia muestra, por medio de desagregar la capacitancia del sistema teórico, igual a 8,836 [pF]. Este resultado es cercano al real medido (9,979 [pF]). La diferencia es de 1,142 [pF], esto se puede atribuir directamente al ruido del sistema, a las perturbaciones y a la influencia de la jaula de Faraday, ya que solo se utilizó el valor medido con anterioridad (sin la jaula improvisada), ya que no había posibilidad de realizar una medición a través del cable. Esto sucede, ya que el cable no interviene en la medición por estar activada la guarda. El promedio de los errores es 4,4686%, por lo que podemos decir que la carga teórica y la carga calculada a través de las mediciones es menor al 5%, un valor esperado.

Ya habiendo terminado con la validación, se realiza un procedimiento similar al anterior, pero con el detector prototipo. Aquí se tiene en cuenta que el detector no cancela activamente la capacitancia de entrada, por lo que se utilizan los valores resaltados en la sección pertinente. Se utiliza el mismo capacitor muestra de 10 [pF] (medido 9,979 [pF]), las capacidades  $C_{INmin} = 11,6206$  [pF] y  $C_{INmax} = 12,0914$  [pF] para realizar los cálculos, la copa triaxial (ya que comprobaremos la capacidad de eliminar las pérdidas del cable y proteger de las perturbaciones) y valores de tensiones similares. Los valores de tensión serán: 0,5 [V], 1 [V] y 2 [V]. Este último valor no es de 3 [V], dado que el electrómetro se saturaría en caso de alcanzar este valor, por lo que se decide mantener la carga a este valor máximo, a fin de verificar el método.

En este caso, se utilizará el osciloscopio para poder medir el valor de tensión, aunque durante el desarrollo de las mediciones, se comprobó que había mucho ruido eléctrico, por lo que se midió un offset entre 7 y 11 [mV]. Esto afecta a las medidas realizadas, por lo que, para obtener mejores resultados, se debería realizar dentro de una jaula de mejor calidad y con una línea de alimentación más limpia.

El procedimiento por realizar es similar al anterior, tomando los valores de tensión pertinentes. Luego se realiza el cálculo de la carga eléctrica utilizando el valor de la capacidad total real máximo y mínimo (correspondiente a los valores del detector, ya nombrados), utilizando los valores de tensión obtenidos. Luego se calcula un promedio de los valores de tensión y un promedio de los valores de carga



calculados (mayor y menor), como así también, un promedio de estos dos. Finalmente se calcula la capacitancia muestra, sustrayendo la capacitancia del sistema desagregado, de modo que se puede confirmar la similitud mantenida con el valor de capacitancia real de muestra.

Con las capacidades  $C_{INmin} = 11,6$  [pF] y  $C_{INmax} = 12,1$  [pF], se obtiene el valor de capacitancia total del sistema a través de la ecuación:  $C_{INx} + C_{CopaTriax.} + C_{10[pF]}$ . Para cada uno de los casos obtenemos:  $C_{Tmin} = 38,36$  [pF] y  $C_{Tmin} = 38,86$  [pF]. Su promedio es  $C_{TProm.} = 38,61$  [pF]

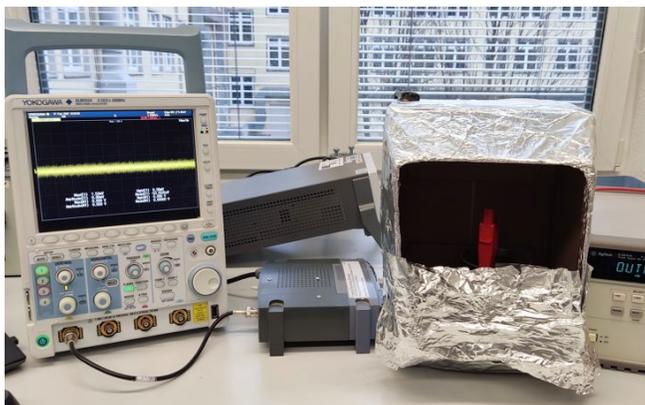
El valor de capacitancia promedio del sistema desagregado es de: 28,63 [pF]. Hay que recordar que el sistema de guarda elimina el efecto del conector entre el detector y la copa, pero no el del mismo detector.

V. Fuente [V]	V. Detector [V]	Cál. $Q_{min}=V \cdot C_{Tmin}$ [pC]	Cál. $Q_{max}=V \cdot C_{Tmax}$ [pC]	$V_{Prom.}$ [V]	$Q_{Prom.}$ [pC]	Cál. $Q_{Prom.Total}$ [pC]	Cál. $C_{Muestra}$ [pF]
0,5	0,31	11,8916	12,0466	0,3467	$Q_{Prom.min}$ 13,2981  $Q_{Prom.max}$ 13,4715	13,4	9,97
0,5	0,42	16,1112	16,3212				
0,5	0,36	13,8096	13,9896				
0,5	0,38	14,5768	14,7668				
0,5	0,38	14,5768	14,7668				
0,5	0,34	13,0424	13,2124				
0,5	0,38	14,5768	14,7668				
0,5	0,3	11,508	11,658				
0,5	0,36	13,8096	13,9896				
0,5	0,31	11,8916	12,0466				
0,5	0,34	13,0424	13,2124				
0,5	0,33	12,6588	12,8238				
0,5	0,38	14,5768	14,7668				
0,5	0,31	11,8916	12,0466				
0,5	0,3	11,508	11,658				
1	0,55	21,098	21,373	0,5827	$Q_{Prom.min}$ 22,3511  $Q_{Prom.max}$ 22,6424	22,5	9,97
1	0,66	25,3176	25,6476				
1	0,57	21,8652	22,1502				
1	0,6	23,016	23,316				
1	0,65	24,934	25,259				
1	0,59	22,6324	22,9274				
1	0,6	23,016	23,316				
1	0,57	21,8652	22,1502				
1	0,59	22,6324	22,9274				



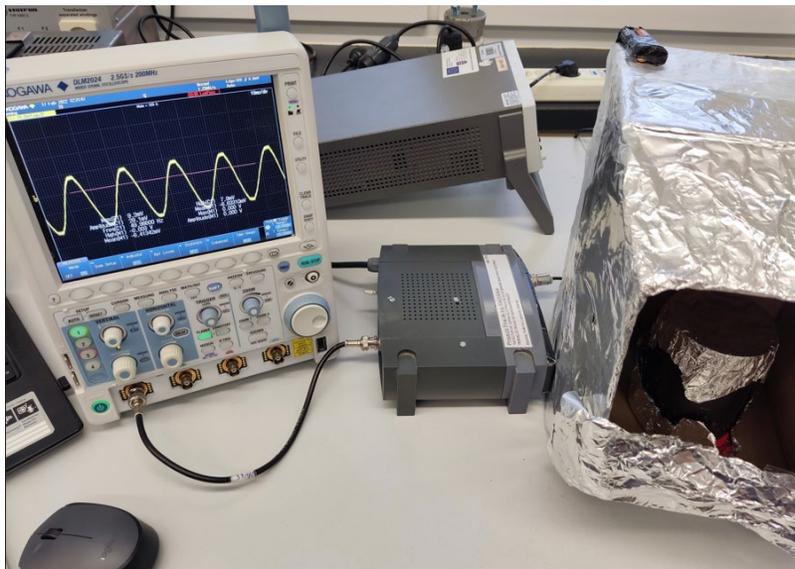
1	0,64	24,5504	24,8704				
1	0,6	23,016	23,316				
1	0,54	20,7144	20,9844				
1	0,55	21,098	21,373				
1	0,53	20,3308	20,5958				
1	0,5	19,18	19,43				
2	1,08	41,4288	41,9688				
2	1,1	42,196	42,746				
2	0,99	37,9764	38,4714				
2	1,05	40,278	40,803				
2	1	38,36	38,86				
2	1,05	40,278	40,803				
2	1,1	42,196	42,746				
2	1,02	39,1272	39,6372	1,0407	Q <sub>Prom.min</sub> 39,92	40,2	9,97
2	1,1	42,196	42,746				
2	0,99	37,9764	38,4714				
2	1	38,36	38,86				
2	1,04	39,8944	40,4144				
2	1	38,36	38,86				
2	1,03	39,5108	40,0258				
2	1,06	40,6616	41,1916				
					Q <sub>Prom.max</sub> 40,4403		

Finalmente se obtiene un promedio de 9,97 [pF] para la muestra (capacitor de 10[pF]). Esto nos da un error casi nulo, por lo que se afirma que es correcto el método, aunque se deberían realizar más pruebas para corroborar la capacitancia de entrada del detector, de modo que se pueda reducir la incertidumbre. El error de la comparación de los valores promedios de carga entre el KEITHLEY y el detector se puede atribuir a que el sistema completo no fue medido con su capacitancia total dentro de la jaula, sumado a que el osciloscopio presentaba un ruido de fondo, aunque la muestra fuera cortocircuitada. Esto se ve en la siguiente imagen:



### 6.1.8 Conclusiones Técnicas

Se puede concluir que la elección de los amplificadores fue correcta, ya que la linealidad, la sensibilidad y las características pudieron cumplir con lo esperado. La construcción de la fuente de alimentación de bajo ripple dio buenos resultados, aunque se comprueba durante las pruebas que genera ruido interno de 50 [Hz], por lo que una mejora sustancial en el diseño sería la de blindar al circuito detector, de modo que se eliminen las interferencias generadas interna y externamente. Esto se puede ver en la siguiente imagen, donde a pesar de que trabajemos dentro de la jaula de Faraday improvisada, la medición muestra ruido de línea, lo que interviene en el valor final calculado.



Otras mejoras que se podrían realizar es el agregado de una jaula de Faraday interna conectada a la guarda, que cubra todo el amplificador principal. Esto se estipuló durante la construcción, por lo que el circuito incluye la posibilidad de esta conexión. Queda en evidencia la necesidad de construir una jaula de Faraday para poder llevar adelante cualquier medición, ya que al trabajar en ordenes de magnitudes tan bajos, cualquier carga electrostática del ambiente puede perturbar la medición. Por otro lado, el estudio estadístico es imprescindible para llegar a un resultado concluyente.

A lo largo del desarrollo se han encontrado diversas dificultades respecto al ruido, pero a pesar de esto, se llegaron a obtener valores cercanos a los esperados, y hasta en algunos casos coincidieron con el ideal. La linealidad, la sensibilidad coincidieron con lo esperado, y el método fue verificado, por lo que, con posteriores modificaciones y mejoras del prototipo, se podrán obtener mejores resultados. Los objetivos del proyecto fueron alcanzados exitosamente, y se dejó en exposición las mejoras posibles que pueden realizarse, fuera de este trabajo. Actualmente ya se ha desarrollado un segundo prototipo, similar al anterior, para otras pruebas y modificaciones.



## 6.2 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Como se explicó anteriormente, este proyecto se realiza a raíz de un proyecto principal, del laboratorio LEMD, código CCUTNME0007754. La viabilidad de la rentabilidad fue evaluada en el marco de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado, Rectorado. Esto quiere decir que, la inversión realizada para el desarrollo del proyecto detector fue aprobados antes de comenzar, por lo que los beneficios del desarrollo del detector están dados por los objetivos del PID principal. Estos beneficios se desarrollaron anteriormente, como, por ejemplo: obtener un detector de bajo costo, sensible y de fácil manipulación, contrastación del método de medición y el desarrollo de procedimientos para realizar las mediciones.

A continuación, se muestran los costos de desarrollo del primer prototipo, en pesos y en dólares (\$380 por cada dólar).

Parte	Artículo	Cantidad	Costo	Costo Final
Fuente de Alimentación	Transformador partido 9+9V 500mA LUXEL	1	\$2.120	\$2.120
	Bornera 3 pin	2	\$250	\$500
	Rectificador 1000V 3A	1	\$300	\$300
	Capacitores Electrolítico KETUO 1000uF 16V	2	\$70	\$140
	Capacitores Electrolítico KETUO 10uF 25V	2	\$50	\$100
	Capacitores Cerámicos COSONIC 100 nF	2	\$35	\$70
	Capacitores Tantalio SPRAGUE 5,7uF 10V	2	\$100	\$200
	Diodos PHILIPS 1N4007 1000V 1A	4	\$40	\$160
	Presets 1K	2	\$180	\$360
	Resistencias metálicas	2	\$15	\$30
	Regulador de Tensión LM317	1	\$230	\$230
	Regulador de Tensión LM337	1	\$230	\$230
	PCB PERTINAX 10*10 simple	1	\$300	\$300
Electrómetro	Diodo 1N4004 PHILIPS	1	\$250	\$250
	Relay ME-15M 005-TS MASSUSE 5V 10A	1	\$800	\$800
	Transistor 2N2222A PHILIPS	1	\$60	\$60
	Resistencias de Carbón	4	\$10	\$40



	Ficha Triaxial	1	\$15.000	\$15.000
	Ficha BNC	1	\$250	\$250
	Capacitores Cerámicos 100nF 50V COSONIC	2	\$35	\$70
	Capacitores Tantalio 1uF 10V SPRAGUE	2	\$100	\$200
	Jumpers	2	\$20	\$40
	Bornera 2 entradas	1	\$250	\$250
	Bornera 3 entradas	1	\$250	\$250
	Amplificador LMP7721	1	\$2.300	\$2.300
	Amplificador LMP7715	1	\$1.200	\$1.200
	PCB PERTINAX 10*10 doble	1	\$300	\$300
	Separadores - Arandela 10cm	1	\$240	\$240
	Tornillos y Tuercas	8	\$50	\$400
<b>Conexión</b>				
	Cable taller 1m	2	\$600	\$1.200
	leds 5mm	2	\$100	\$200
	Cable Triaxial 1m	1	\$450	\$450
	Ficha Triaxial	3	\$15.000	\$45.000
	Ficha Coaxial	3	\$250	\$750
<b>Gabinete</b>				
	RECICLADO - Costo Impresión 3D	1	\$1.500	\$1.500
<b>Periféricos</b>				
	Copas - RECICLADO	1	\$0	\$0
	Caja de Prueba - RECICLADO	1	\$0	\$0
<b>Horas Ingeniería</b>				
	Alumno	560	\$1100	\$616.000
			<b>Pesos</b>	<b>Dólares</b>
<b>Sub Total Costos (Sin Horas de Ing.)</b>			\$75.490	US\$199
<b>TOTAL</b>			\$691.490	US\$1.820

En este caso, al ser el primer prototipo, los costos son altos. Esto sucede porque los periféricos generan un aumento del costo, al ser necesarios para las pruebas de contrastación y calibración. Si se comenzara a producir en serie, los costos vendrían dados por el tiempo que lleva armar las placas, ensamblar el



detector y realizar una prueba simple de calibración. Para el resto de los dispositivos, el costo se da en la siguiente tabla:

Parte	Articulo	Cantidad	Costo	Costo Final
Fuente de Alimentación	Transformador partido 9+9V 500mA LUXEL	1	\$2.120	\$2.120
	Bornera 3 pin	2	\$250	\$500
	Rectificador 1000V 3A	1	\$300	\$300
	Capacitores Electrolítico KETUO 1000uF 16V	2	\$70	\$140
	Capacitores Electrolítico KETUO 10uF 25V	2	\$50	\$100
	Capacitores Cerámicos COSONIC 100 nF	2	\$35	\$70
	Capacitores Tantelio SPRAGUE 5,7uF 10V	2	\$100	\$200
	Diodos PHILIPS 1N4007 1000V 1A	4	\$40	\$160
	Presets 1K	2	\$180	\$360
	Resistencias metálicas	2	\$15	\$30
	Regulador de Tensión LM317	1	\$230	\$230
	Regulador de Tensión LM337	1	\$230	\$230
	PCB PERTINAX 10*10 simple	1	\$300	\$300
Electrómetro	Resistencias de Carbón	3	\$10	\$30
	Ficha Triaxial	1	\$15.000	\$15.000
	Ficha BNC	1	\$250	\$250
	Capacitores Cerámicos 100nF 50V COSONIC	2	\$35	\$70
	Capacitores Tantelio 1uF 10V SPRAGUE	2	\$100	\$200
	Jumpers	2	\$20	\$40
	Bornera 2 entradas	1	\$250	\$250
	Bornera 3 entradas	1	\$250	\$250
	Amplificador LMP7721	1	\$2.300	\$2.300
	Amplificador LMP7715	1	\$1.200	\$1.200
	PCB PERTINAX 10*10 doble	1	\$300	\$300
	Separadores - Arandela 10cm	1	\$240	\$240
Tornillos y Tuercas	8	\$50	\$400	



<b>Conexión</b>	Cable taller 1m	2	\$600	\$1.200
	leds 5mm	2	\$100	\$200
	Cable Triaxial 1m	0,3	\$450	\$135
	Ficha Triaxial	1	\$15.000	\$15.000
	Ficha Coaxial	1	\$250	\$250
<b>Gabinete</b>	Costo Impresión 3D	1	\$1.500	\$1.500
<b>Horas Ingeniería</b>	Alumno	13,5	\$1100	\$14.850
			<b>Pesos</b>	<b>Dólares</b>
<b>Sub Total Costos (Sin Horas de Ing.)</b>			\$43.515	US\$115
<b>TOTAL</b>			\$58.365	US\$154

Vemos que el precio del detecto disminuye notablemente, dado que las horas que se necesitan para el ensamblaje y las pruebas son pocas. Se observa que algunos de los dispositivos que se utilizaron para la construcción del prototipo no están, estos son los utilizados para el sistema de serialización. No se utilizan ya que este subsistema no se utilizará hasta mejorar el diseño, de modo que no perturbe el funcionamiento. Esto ya se especificó en los objetivos.

<b>CALCULO DE HORAS POR UNIDAD</b>	
ACTIVIDADES	HORAS
Impresión placas + agujereado	2
Ensamblaje y soldado	2,5
Armado de gabinete	3
Verificaciones	1
Pruebas y Calibracion	5
Total	13,5

Según la documentación del PID, el presupuesto fue de \$1.341.152, que es, aproximadamente US\$18.000. Esto quiere decir que el presupuesto indicado por el PID está por encima del gasto de desarrollo del prototipo, confirmando la posibilidad del desarrollo.



Para el caso de realizar el estudio económico para obtener el VAN igual a cero, se realizan los siguientes cálculos:

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO (PURO O SIN FINANCIACIÓN)						
Años	0	1	2	3	4	5
Cantidad de Unidades		4	4	4	4	4
Ingresos		1.400.760	1.400.760	1.400.760	1.400.760	1.400.760
<b>Costos Fijos</b>						
Servicios (Elec., Conex., Agua., Muni.)		36.000	36.000	36.000	36.000	36.000
Publicidad		72.000	72.000	72.000	72.000	72.000
Alquiler		180.000	180.000	180.000	180.000	180.000
Gastos Varios		42.000	42.000	42.000	42.000	42.000
Gastos de Admin./Legal/Contable		360.000	360.000	360.000	360.000	360.000
Costo Fijo Total		690.000	690.000	690.000	690.000	690.000
<b>Costos Variables</b>						
Costo Unidad		233.460	233.460	233.460	233.460	233.460
Gastos de Venta (Envío postal)		20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Dispositivos Electrónicos	300.000	-	-	300.000	-	-
Instrumental y Herramientas	800.000	-	-	-	-	-
Verificaciones y Contrastación		-	-	35.000	-	-
Costo Variable Total		253.460	253.460	588.460	253.460	253.460
<b>COSTOS TOTALES</b>		943.460	943.460	1.278.460	943.460	943.460
Depreciación		260.000	260.000	260.000	260.000	260.000
Utilidad Antes de Impuestos		197.300	197.300	- 137.700	197.300	197.300
Impuesto (20%)		39.460	39.460	- 27.540	39.460	39.460
Utilidad Después de Impuestos		157.840	157.840	- 110.160	157.840	157.840
Depreciación		260.000	260.000	260.000	260.000	260.000
Inversión Inicial	300.000					
Inversión Equipamiento Total	1.100.000					
Inversión Capital de Trabajo	406.825					
Recuperación Capital de Trabajo						406.825
Valor de Liquidación						465.000
<b>Flujo de Caja Neto</b>	- 1.806.825	417.840	417.840	149.840	417.840	1.289.665
<b>Flujo de Caja Neto Acumulado</b>	- 1.806.825	- 1.388.985	- 971.145	- 821.305	- 403.465	886.200

Los datos extendidos de depreciación, cálculo de liquidación y otros pueden verse directamente en el documento de cálculo de Excel.

### 6.3 APROXIMACIÓN AL VALOR ACTUAL NETO

Los cálculos se realizarán en pesos, aunque se debe tener en cuenta que la inflación distorsionó el valor del presupuesto inicial el PID principal, de modo que, hoy en día, serían \$6.840.000 (con un valor de \$380 por cada US\$1) y no \$1.314.152 (siendo \$73 por cada US\$1 en ese momento). Se observa que la inversión inicial total será de \$1.806.825. El costo de cada unidad posterior a la inversión inicial es de \$58.365. Se puede tener en cuenta que, al ser un producto novedoso, que no se encuentra en el mercado, puede ser difícil su inserción comercial, aunque también existe la ventaja de ser un producto único, el cual no tiene competidor directo con las mismas características.



Se puede colocar un precio de lanzamiento de unos \$350.190 (US\$922), que es aproximadamente 6 veces el valor del costo. Suponiendo que las ventas se calculan para que el VAN de cercano a cero, utilizando el flujo de caja anterior:

Flujo de Caja Neto	- 1.806.825	417.840	417.840	149.840	417.840	1.289.665
--------------------	-------------	---------	---------	---------	---------	-----------

VAN	3.335
-----	-------

Vemos que el total de detectores vendidos para obtener un VAN cercano a cero es de 20 detectores en 5 años, lo que se aproxima a 4 por año.

Para realizar un cálculo en base lo esperado en ventas, se hace un estudio de mercado. Para esto se investiga a través de fuentes estatales las distintas instituciones y empresas que existen, que podrían ser un comprador potencial. Luego se toma un porcentaje de efectividad posible para comparar con las ventas que se estiman a través de cálculos propios:

TIPO	Cantidad	Link
Instituciones Educación Superior	131	<a href="https://estad">https://estad</a>
TIPO	Cantidad	Link
Carreras de Electrónica	184	<a href="https://guiad">https://guiad</a>
Carreras de Bioingeniería y Med.	43	'
Carreras en Física	217	'
Carreras Minería, Petróleo y Química	278	'
Carreras Micro- Nano-	7	'
Carreras Nuclear	7	'
Carreras Agronómicas	152	'
Posgrado General Relacionados (aprox)	300	'
CONICET	251	<a href="https://www">https://www</a>
INTA sedes	448	<a href="https://www">https://www</a>
Empresas de Instrum., Electr., I+D	7200	<a href="https://biblic">https://biblic</a>
<b>TOTAL</b>	9087	-
<b>Posibles Interesados</b>	1,50%	136,305
<b>NO SE HA CONTABILIZADO EMPRESAS DEDICADAS A LA VENTA</b>		

Para ver las páginas de referencia, dirigirse a el documento correspondiente.

Se realiza el flujo de caja para un estimativo real del desarrollo de la empresa de forma anual, aumentando las ventas año tras año.



FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO (PURO O SIN FINANCIACIÓN)						
Años	0	1	2	3	4	5
Cantidad de Unidades	0	8	11	15	21	29
Ingresos	0	2.801.520	3.852.090	5.252.850	7.353.990	10.155.510
<b>Costos Fijos</b>						
Servicios (Elec., Conex., Agua., Muni.)		36.000	36.000	36.000	36.000	36.000
Publicidad		72.000	72.000	72.000	72.000	72.000
Alquiler		180.000	180.000	180.000	180.000	180.000
Gastos Varios		42.000	42.000	42.000	42.000	42.000
Gastos de Admin./Legal/Contable		360.000	360.000	360.000	360.000	360.000
Costo Fijo Total		690.000	690.000	690.000	690.000	690.000
<b>Costos Variables</b>						
Costo Unidad		466.920	642.015	875.475	1.225.665	1.692.585
Gastos de Venta (Envío postal)		40.000	55.000	75.000	105.000	145.000
Dispositivos Electrónicos	300.000	-	-	300.000	-	-
Instrumental y Herramientas	800.000	-	-	-	-	-
Verificaciones y Contrastación		-	-	35.000	-	-
Costo Variable Total		506.920	697.015	1.285.475	1.330.665	1.837.585
<b>COSTOS TOTALES</b>		1.196.920	1.387.015	1.975.475	2.020.665	2.527.585
Depreciación		260.000	260.000	260.000	260.000	260.000
Utilidad Antes de Impuestos		1.344.600	2.205.075	3.017.375	5.073.325	7.367.925
Impuesto (20%)		268.920	441.015	603.475	1.014.665	1.473.585
Utilidad Después de Impuestos		1.075.680	1.764.060	2.413.900	4.058.660	5.894.340
Depreciación		260.000	260.000	260.000	260.000	260.000
Inversión Inicial	300.000					
Inversión Equipamiento Total	1.100.000					
Inversión Capital de Trabajo	406.825					
Recuperación Capital de Trabajo						406.825
Valor de Liquidación						465.000
Flujo de Caja Neto	- 1.806.825	1.335.680	2.024.060	2.673.900	4.318.660	7.026.165
Flujo de Caja Neto Acumulado	- 1.806.825	- 471.145	1.552.915	4.226.815	8.545.475	15.571.640

A continuación, se muestra el porcentaje de las ventas totales previstas respecto al total de los posibles compradores y el VAN correspondiente.

<b>Cantidad Total de Unidades Previstas</b>	<b>%Represent.</b>
84	61,63%
<b>%Aumento de Ventas Respecto al Año Previo</b>	35%

<b>VAN</b>	9.633.965
------------	-----------

Se observa un VAN positivo, por lo que este proyecto nos da ganancia en comparación de la tasa de interés fijada.

## 6.4 TASA INTERNA DE RETORNO

La TIR calculada para el caso de ventas esperadas nos da como resultado:

<b>TIR</b>	109%
------------	------

Por lo que se puede concluir que, al ser un valor elevado, la posibilidad de que este proyecto sea rentable, según las previsiones hechas, es alta.



## 6.5 PAYBACK O PLAZO DE RECUPERACIÓN

Para el cálculo del Payback, utilizamos los datos del inciso del cálculo del VAN. Siendo:

Flujo de Caja Neto	- 1.806.825	1.335.680	2.024.060	2.673.900	4.318.660	7.026.165
Flujo de Caja Neto Acumulado	- 1.806.825	- 471.145	1.552.915	4.226.815	8.545.475	15.571.640
<b>Payback</b>						<b>2</b>

El tiempo es aproximadamente 2 años, por lo que sería menos de la mitad del tiempo de duración de vida de la empresa lo que se tarda en recuperar la inversión realizada.

## 6.6 PRODUCTOS Y SERVICIOS DE OTROS FABRICANTES

Durante la búsqueda y recopilación de la información en la etapa del proyecto correspondiente, se verificó que no existen productos tal como el desarrollado. Esto es porque los detectores de carga eléctrica comerciales, o también llamados culombímetros, son dispositivos analógicos que difícilmente son sensibles a cargas menores del orden del  $[\mu\text{C}]$ , teniendo en cuenta que el detector de este proyecto alcanza el orden de los  $[\text{pC}]$ . Para obtener resultado de esta magnitud, se deben comprar electrómetros más complejos, que tienen más funciones y son más complejos, por lo tanto, más costosos. Estos electrómetros constan de diferentes funciones como culombímetro, voltímetro, óhmetro, amperímetro y otros. Para nuestra aplicación, no se justifica la compra de un electrómetro con tantas funciones, dado que no se aprovecharán y tendremos un costo muy alto, que queda fuera del alcance del presupuesto del proyecto. Un ejemplo es el electrómetro patrón utilizado para la contratación, KEITHLEY 6517B, el cual tiene un precio que alcanza los US\$12.000.

Esto justifica el desarrollo utilizado, y la posibilidad de desarrollar un producto para el PID principal, de modo que se logren achicar costos hasta en un 85%, equivalente a US\$10.200. A pesar de que aún se necesitan realiza mejoras y realizar otras versiones de detectores, el costo que estos conllevarán serán bajos, y aún estarán dentro del presupuesto, de modo que tampoco se justificaría invertir en un electrómetro comercial. Por otro lado, el detector desarrollado permite realizar modificaciones según la necesidad, comparado con el electrómetro comercial, el cual no se puede modificar.

Por otro lado, para el caso de realizar la fabricación del dispositivo, a parte de los elementos adquiridos en comercios, el gabinete se construye a pedido, al igual que la mano de obra utilizada durante la construcción. Los servicios de contrastación de instrumentos corresponden a las empresas de servicio técnico correspondiente.



## APÉNDICE A: REFERENCIAS

La siguiente tabla contiene los documentos a los que se hace referencia en este documento

Nombre del documento y versión	Descripción	Ubicación
Carpeta Online	Carpeta virtual en línea de todos los documentos	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1NQ0LITbJLH4TOCtHUoAHZkMVRILgGmBe?usp=share_link">https://drive.google.com/drive/folders/1NQ0LITbJLH4TOCtHUoAHZkMVRILgGmBe?usp=share_link</a>
Informe del Proyecto 2.1	El informe actualizado de este proyecto.	<a href="https://drive.google.com/file/d/11ly-fwCfLisQiSzqfuS7VBv8u95zhfkS/view?usp=share_link">https://drive.google.com/file/d/11ly-fwCfLisQiSzqfuS7VBv8u95zhfkS/view?usp=share_link</a>
PID CCUTNME0007754 - LEMD	PID principal	<a href="https://drive.google.com/file/d/1D1HIJok85b2YKTDB2x9kQmm9Q8B1O2G9/view?usp=share_link">https://drive.google.com/file/d/1D1HIJok85b2YKTDB2x9kQmm9Q8B1O2G9/view?usp=share_link</a>
Instructivo 1.0	Instructivo de uso en español	<a href="https://drive.google.com/file/d/1ugZmdcpT2b8Y-HC5Le0A-c4mD-P0RcA1/view?usp=share_link">https://drive.google.com/file/d/1ugZmdcpT2b8Y-HC5Le0A-c4mD-P0RcA1/view?usp=share_link</a>
Cálculo Económico 2.1	Cálculo económico realizado	<a href="https://docs.google.com/spreadsheets/d/1FmuP-oFR5l_XMuXLq2o9QZoMfp3PCpff/edit?usp=share_link&amp;oid=112279319645239243653&amp;rtpof=true&amp;sd=true">https://docs.google.com/spreadsheets/d/1FmuP-oFR5l_XMuXLq2o9QZoMfp3PCpff/edit?usp=share_link&amp;oid=112279319645239243653&amp;rtpof=true&amp;sd=true</a>
Presentación Final	Presentación utilizada durante la exposición final	<a href="https://drive.google.com/file/d/12V443Ss2-AWY3e6Z_1a1iqar9bKleilV/view?usp=share_link">https://drive.google.com/file/d/12V443Ss2-AWY3e6Z_1a1iqar9bKleilV/view?usp=share_link</a>
Video explicativo	Video utilizado en la exposición final	<a href="https://drive.google.com/file/d/13t3bwe_0zJoTOB7ghp8khjzMOcreCfEy/view?usp=share_link">https://drive.google.com/file/d/13t3bwe_0zJoTOB7ghp8khjzMOcreCfEy/view?usp=share_link</a>



## **APÉNDICE B: DICCIONARIO**

La siguiente tabla proporciona definiciones de palabras relevantes para este documento.

<b>Palabra</b>	<b>Definición</b>
EASMTN	Detector de Carga Eléctrica de Alta Sensibilidad para Muestras Triboeléctricas de Nanomateriales
PID	Proyecto de investigación y desarrollo
Detector de carga eléctrica	Permite obtener un valor físico que permite la obtención indirecta de la carga eléctrica
Electrómetro/Culombímetro	Permite obtener la carga eléctrica de forma directa, en coulomb y submúltiplos
Ruido/Perturbaciones	Se refiere a las modificaciones aleatorias de las magnitudes físicas a causa del ambiente y el entorno del sistema que influye en el mismo