

Caracterización de Circuitos RLC Planares usando 3 métodos de fabricación para componentes 3D

Luis Santiago Moreno Quintero

Monografía Presentada Para Obtener el Título de Ingeniero Electrónico

Director

Msc. Ing. Ricardo Casallas Gutiérrez

Codirector

Ph.D. Ing. William Fabián Chaparro Becerra.

Universidad Santo Tomás Tunja

Ingeniería Electrónica

Pregrado

Tunja

2025



Universidad Santo Tomás

Cita	(Moreno Quintero, L. S. 2024)
Referencia	Moreno Quintero, L. S. (2024). <i>Caracterización de Circuitos RLC Planares usando 3 métodos de fabricación para componentes 3D</i> modalidad de Monografía Universidad Santo Tomás, Tunja(A-Z).
Estilo APA 7 (2020)	



Repositorio Institucional: <https://crai.santototunja.edu.co/>

Universidad Santo Tomás Tunja - <https://www.santototunja.edu.co/>

Rector: Fray José Fernando Mancipe, O.P.

Decano/Director Ph.D. William Fabián Chaparro Becerra.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad Santo Tomás ni de la Facultad de Ingeniería Electrónica. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a la universidad de los andes, al laboratorio sala limpia, al laboratorio ML013 y a la ingeniera Alba Ávila por su conocimiento y por permitirme el uso de las instalaciones de la universidad de los andes como de los equipos utilizados. También quiero agradecer a mi familia por el apoyo que me brindaron, la compañía y la comprensión. además de agradecer a mi director de tesis el ingeniero Ricardo Casallas por responder mis inquietudes y por su paciencia.

Índice

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1 Descripción del proyecto	13
2 Planteamiento del problema	14
3 Justificación	15
3.1 Justificación económica	15
3.2 Justificación en investigación	15
3.3 Justificación de diseño	15
4 Impacto social	17
5 Objetivos	18
5.1 Objetivo general	18
5.2 Objetivos específicos	18
6 Marco teórico y estado del arte	19
6.1 Base Teórica	19
6.1.1 Concepto de resistividad	19
6.1.2 Concepto de capacitancia	20
6.1.3 Concepto de Inductancia	21
6.2 Antecedentes Históricos	22

7	Métodos de fabricación	23
7.1	Fabricación aditiva	23
7.1.1	Etapas del proceso	24
7.1.2	Ventajas:	24
7.1.3	Desafíos:	24
7.2	Sustracción de material	25
7.2.1	Etapas del proceso	25
7.2.2	Ventajas:	26
7.2.3	Desafíos:	26
7.3	Impresión de tinta conductora	27
7.3.1	Etapas del proceso	27
7.3.2	Ventajas:	27
7.3.3	Desafíos:	28
8	Metodología del trabajo	29
8.1	Estudio del Estado del Arte	29
8.2	Trabajo Desarrollado	29
9	Equipos de Medición	30
9.1	Caracterización Rigol DM3058E	30
9.1.1	Puntas de Medición	30
9.2	BK precision 891	31
9.3	Caracterización Agilent 4294A	31
9.3.1	Puntas de Medición	32

10	Descripción de Muestras	33
10.1	Fabricación Aditiva	33
10.2	Fabricación CNC	34
10.2.1	Diseño en Software CNC	35
10.3	Fabricación SV2	36
11	Experimentos Realizados	36
11.1	Método de medición	39
11.2	Mediciones comerciales	40
11.3	Mediciones Muestras	41
11.4	Medición de circuitos RLC Pruebas	43
12	Análisis en Frecuencia	45
13	Comparación de los Circuitos	51
14	Conclusiones	52
15	Trabajos Futuros	54
16	Estrategias de Divulgación	55
	Referencias	56

Lista de tablas

1	Tabla resistividad. Fuente: Young et al. (2009)	19
2	Características internas del Rigol DM3058E. Fuente: RIGOL TECHNOLOGIES, (2020)	30
3	Resistencias FA Variación Alto. Fuente: Autor	37
4	Resistencias FA Variación Ancho. Fuente: Autor	38
5	Mediciones resistencias comerciales. Fuente: Autor	40
6	Mediciones resistencias Fabricación CNC. Fuente: Autor	41
7	Mediciones capacitancia e inductancia. Fuente: Autor	43
8	Tabla de ventajas y desventajas. Fuente: Autor	52

Lista de figuras

1	.....	23
2	.....	25
3	.....	26
4	.....	28
5	.....	32
6	.....	34
7	.....	35
8	.....	36
9	.....	39
10	.....	40
11	.....	42
12	.....	43
13	.....	44
14	.....	44
15	.....	45
16	.....	48
17	.....	49
18	.....	50
19	.....	50

Resumen

En los últimos años nuevos métodos fabricación han tomado una relevancia importante en la fabricación de prototipos y en la investigación de estos, esto ha dado como resultado el avance en materiales para la obtención de dispositivos, el desarrollo de estas tecnologías puede dar como resultado una mejora en los costos de fabricación mejorando los tiempos de desarrollo. En este documento se trabajó sobre la fabricación de circuitos RLC que son la base de la electrónica asimismo se revisaron los fundamentos teóricos, los métodos de fabricación y los datos obtenidos.

con esto se busca hacer un análisis en frecuencia de los circuitos, creados con los diferentes métodos de fabricación teniendo en cuenta las propiedades de los materiales que se van a usar y la forma de implementación de estos.

Para este proyecto se contó con la ayuda de la Universidad de los andes la cual puso a su disposición material y equipo esencial para la elaboración de este documento y sin el cual no hubiese sido posible.

Palabras clave: Impresión 3D, Fabricación de prototipos, industria electrónica.

Abstract

In recent years, new manufacturing methods have taken an important relevance in the manufacture of prototypes and in the research on these, this has resulted in progress in materials for obtaining devices; the development of these technologies can result in an improvement in manufacturing costs by improving development times. In this document, we worked on the fabrication of RLC circuits, which are the basis of electronics. We also reviewed the theoretical foundations, the fabrication methods and the data obtained.

With this, we seek to make a frequency analysis of the circuits created with the different fabrication methods, taking into account the properties of the materials to be used and the way they are implemented.

This project was carried out with the help of the University of Los Andes, which provided us with essential material and equipment for the elaboration of this document, without which it would not have been possible.

Keywords: 3D Printing, Prototyping, electronics industry.

Introducción

El diseño y fabricación de electrónica impresa ha significado un avance importante en el desarrollo de dispositivos electrónicos, dando ventajas que dan lugar a un cambio importante en diversas industrias. Esta forma de fabricación ha generado una mejora en la producción en gran volumen disminuyendo el precio y sin grandes dificultades. hasta ahora estos circuitos se han fabricado de manera similar a la utilizada en otras industrias esto es depositando tintas en superficies planas. tenemos varios ejemplos prácticos de esta forma de fabricación como lo pueden ser el RFID, teclados pantallas y sensores. los avances en materiales con capacidades conductoras y el desarrollo que permite dar con dispositivos 3D utilizando diferentes compuestos abre nuevas posibilidades que antes no existían o no permitían los métodos de impresión 2D empleados en diseño. Se pueden clasificar los métodos de impresión 3D en: escritura directa en superficie, pos-procesamiento por inyección, impresión 3D libre. Flowers et al. (2017)

Esta nueva forma de impresión, que consiste en la deposición de ciertos materiales sobre una superficie plana más conocida como impresión 3D, en este proceso se obtienen objetos capa por capa con esto podemos lograr un prototipo rápido. este método es muy útil para crear dispositivos prácticos y en pequeñas cantidades que pueden crearse en poco tiempo. Otra ventaja son las formas únicas y la geometría que solo con impresión 3D se pueden crear, en este caso la idea es implementar un filamento conductor que nos dé como resultado diferentes componentes pasivos. Jaksic and Desai (2019)

En este trabajo se contó con la ayuda y colaboración de la facultad de ingeniería electrónica en la Universidad de los andes, en donde colaboraron con el préstamo tanto de las instalaciones, las impresoras de cada método, muestras de fabricación y los equipos de medición. Por otra parte, se agradece el asesoramiento y la experiencia de los ingenieros que colaboraron con este proyecto.

1 Descripción del proyecto

En la actualidad estamos viendo el surgimiento de nuevas técnicas de fabricación de circuitos, como la fabricación aditiva y la utilización de tintas conductoras estas técnicas de fabricación ofrecen importantes avances en costo, posibilidades y capacidad de producción. En este trabajo se busca aportar a la información existente sobre el diseño y la caracterización de circuitos usando los métodos de fabricación antes mencionados además del método de sustracción de material, método ya usado en electrónica en otros ámbitos.

Estos tres métodos de fabricación serán comparados en ámbitos como la resistividad, las propiedades del componente y la respuesta en frecuencia, con esta información tendremos las ventajas y los pormenores de la utilización de estos tres métodos de fabricación además de la búsqueda de bibliografía que se quiere aportar en este trabajo.

Para este trabajo se utilizó un analizador de impedancias 4294A de lo cual se buscó información y se obtuvieron datos, este equipo es interesante pues nos permite ver gráficamente el comportamiento de los circuitos analizados en este trabajo, además de ser una herramienta clave en el análisis en frecuencia.

2 Planteamiento del problema

A raíz de la crisis por la pandemia, la industria electrónica ha enfrentado varios desafíos en la producción y distribución de dispositivos electrónicos a nivel global. La escasez de componentes electrónicos es un problema cada vez más pronunciado que afecta a fabricantes, ensambladores y consumidores por igual. Esta situación se agrava aún más debido a los desafíos logísticos asociados, que incluyen la interrupción en las cadenas de suministro y el transporte, así como la complejidad en la gestión de inventarios y la planificación de producción.

La escasez ha tenido un impacto económico significativo, con pérdidas financieras para las empresas, interrupciones en la producción y un aumento en los precios para los consumidores. La falta de acceso a componentes esenciales ha obstaculizado la innovación en la industria, ya que muchas empresas se ven obligadas a posponer el desarrollo de nuevos productos o a reducir su capacidad de producción.

Ante esta situación se busca explorar nuevas formas de fabricación de circuitos RLC implementando métodos asequibles y cercanos, una de las formas que tenemos de conseguir esto es a través de la impresión de circuitos en 3D.

3 Justificación

3.1 Justificación económica

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, ha demostrado ser una tecnología revolucionaria en diversas industrias, incluyendo la electrónica en nuestro contexto donde la eficiencia y la reducción de costos son elementos clave para la competitividad, entender las ventajas y limitaciones de estos métodos permitirá a las instituciones tomar decisiones que mejoren la capacidad de producir componentes electrónicos personalizados de manera rápida reduciendo significativamente los costos de producción y el tiempo de comercialización. En consecuencia, la fabricación aditiva puede minimizar el desperdicio de material, conduciendo a la reducción de costos de producción y al desarrollo de productos electrónicos más competitivos en el mercado, generando así un impacto positivo en la economía.

3.2 Justificación en investigación

A pesar del creciente interés y adopción de la fabricación aditiva en la industria electrónica, existe la necesidad de ampliar la investigación sobre los diferentes métodos de fabricación 3D y su aplicabilidad para la producción de componentes electrónicos específicos abriendo nuevas oportunidades para comprender en profundidad las tecnologías emergentes en el campo de la ingeniería electrónica, analizando empíricamente las propiedades eléctricas y funcionales de los diferentes circuitos. Este estudio busca aportar a la información existente, una comparación detallada y una caracterización de tres métodos de fabricación 3D con el potencial de identificar áreas de mejora en los procesos fomentando así su desarrollo.

3.3 Justificación de diseño

Los diseños de este trabajo tienen como fin caracterizar y comparar los diferentes métodos de fabricación, centrándose en los circuitos resistivos inductivos y capacitivos, es así como estos diseños pueden ser un modelo para futuras investigaciones en el campo de los circuitos 3D, siendo algo crucial para la electrónica donde empezamos a ver la utilización de la fabricación aditiva. Además, la caracterización de los circuitos es relevante para la creación de dispositivos electrónicos más compactos, precisos y funcionales, mejorando la comprensión de cómo cada método afecta las características eléctricas y físicas de los circuitos permitiendo

a los ingenieros optimizar sus diseños, adaptándolos de manera más efectiva a las necesidades específicas de cada aplicación. Dando como resultado productos electrónicos más innovadores y adaptados a las demandas del mercado, mejorando la calidad de los dispositivos electrónicos en general.

4 Impacto social

Investigación en dispositivos como resistencias, condensadores y bobinas, tienen un impacto significativo en la sociedad, mejorando la calidad de vida y fomentando la innovación. Estas innovaciones pueden dar lugar a dispositivos más eficientes además de mejorar la accesibilidad, en este aspecto los dispositivos fabricados con métodos 3D pueden influir en la fabricación de sensores, filtros y osciladores. Tenemos impulso de invocación, creando nuevos productos tanto para el público como para el sector académico al poder ampliar el campo de la investigación esto puede mejorar la vida diaria de las personas aumentando su eficiencia, ahorrando tiempo y mejorando productividad.

Otro aspecto que se ve beneficiado es la economía con la aparición de nuevos empleos y el desarrollo de nuevas industrias mejorando la competitividad en el mercado actual dando lugar a productos innovadores. Esto permite que surjan nuevas políticas y regulaciones basadas en las necesidades de la industria de fabricación de componentes electrónicos, buscando un entorno beneficioso para el desarrollo.

Todos estos cambios pueden ir de la mano con la apertura de nuevos mercados para la tecnología de fabricación aditiva dando lugar a nuevas oportunidades, además de una reducción en los costos de producción y el aumento de los márgenes de beneficio.

La investigación de circuitos planeares tiene un impacto en la sostenibilidad, al ser posible utilizar material reciclable o Bio-degradable en entorno al filamento conductivo, dando lugar a una mejora en la imagen de este nuevo sector, además de una mejora en el medio ambiente.

5 Objetivos

5.1 Objetivo general

Investigar tres métodos de fabricación para componentes 3D, buscando analizar sus características, ventajas y limitaciones en términos de su funcionalidad y respuesta en frecuencia.

5.2 Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos teóricos de los circuitos RLC y su comportamiento en frecuencia.
- Comparar tres métodos diferentes de fabricación 3D y su aplicabilidad para la creación de componentes tridimensionales en circuitos RLC planares.
- Interpretar mediciones y analizar los circuitos RLC planares fabricados para determinar sus características eléctricas y de rendimiento.
- Comparar los resultados obtenidos de los circuitos RLC planares fabricados con cada método evaluando su respuesta en frecuencia, su eficiencia y precisión.
- Analizar los resultados obtenidos para la aplicación de los métodos de fabricación en circuitos RLC planares.

6 Marco teórico y estado del arte

6.1 Base Teórica

6.1.1 Concepto de resistividad

Para el concepto de resistividad tenemos que conocer que en un conductor la densidad $\vec{J}$ de corriente que fluye a través de un conductor depende del campo eléctrico $\vec{E}$ además de las propiedades del material. $\vec{J}$ es directamente proporcional a $\vec{E}$ en algunos materiales, la mayoría metales y esto es porque la magnitud de $\vec{J}$ y $\vec{E}$ es constante. Es de esta relación que surge la ley de Ohm, para algunas situaciones esta ley no se cumple, pero para el propósito de este documento lo tomaremos como válido.

	Sustancia	$\rho(\Omega \cdot m)$
Metales	Plata	$1,47 \cdot 10^{-8}$
	Cobre	$1,72 \cdot 10^{-8}$
	Oro	$2,44 \cdot 10^{-8}$
	Aluminio	$2,75 \cdot 10^{-8}$
	Tungsteno	$5,25 \cdot 10^{-8}$
	Acero	$20 \cdot 10^{-8}$
	Plomo	$22 \cdot 10^{-8}$
	Mercurio	$95 \cdot 10^{-8}$
Aleaciones	Manganina	$44 \cdot 10^{-8}$
	Constantán	$49 \cdot 10^{-8}$
	Nicromo	$100 \cdot 10^{-8}$

Tabla 1

Tabla resistividad. Fuente: Young et al. (2009)

La resistividad de un material se define como la razón de las magnitudes del campo eléctrico y la densidad de corriente, cuanto mayor sea la resistividad, de mayor será la densidad de corriente ocasionada por un campo dado Tabla 1. las unidades de ρ son $V \cdot m/A$ la relación V/A le llamamos ohm (Ω) por tanto las unidades en SI para ρ son $\Omega \cdot m$. los materiales con menos resistividad son los metales y las aleaciones, los aislantes comúnmente tienen una resistividad del orden de $10^{22} \Omega$ superior.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (1)$$

Para la fabricación de elementos resistivos impresos en 3D podemos obtener diferentes valores de resistencia cambiando las dimensiones del material que estamos utilizando. Esta relación entre el largo del material y la resistencia la podemos escribir como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

6.1.2 Concepto de capacitancia

Para formar un condensador basta con unir dos conductores cuales quiera separados por un aislante (o un vacío) forman un capacitor. Generalmente cada uno de los conductores tiene una carga $Q = 0_{t0}$, después de esto los electrones con carga negativa pasan de un conductor a otro (cargando el capacitor), en este punto cada conductor tiene una carga opuesta al otro y al ser iguales la carga neta es igual a $0C$.

El campo eléctrico en cualquier punto de la región entre los conductores es proporcional a la magnitud de carga Q en cada conductor. Por tanto, la diferencia de potencial V_{ab} entre los conductores también es proporcional a Q . Si se duplica la magnitud de la carga en cada conductor. La razón entre la carga y la diferencia de potencial no cambia, a esta razón se llama capacitancia C de capacitor:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad (3)$$

Dada una diferencia de potencial V_{ab} si hacemos que aumente la capacitancia C también aumentará la magnitud Q para cada conductor, y en consecuencia mayor será la cantidad de energía almacenada. (capacitancia es la medida de la energía que puede almacenar un capacitor), la capacitancia depende de dos valores, la dimensión de los conductores y las características del material que existe entre ellos.

Los capacitores que se pueden implementar para impresión 3D son los de capas paralelas estos se pueden diseñar teniendo en cuenta los parámetros de: permitividad relativa (k), la permitividad en el vacío (ϵ), el área de solapamiento (A), la distancia (d) y el número

de condensadores. estos se pueden relacionar en la siguiente ecuación:

$$C = n \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (4)$$

6.1.3 Concepto de Inductancia

Normalmente cuando tenemos dos circuitos cercanos y dejamos pasar una corriente por uno de ellos creara un campo magnético y este inducirá en el segundo un flujo, al cambiar la corriente en el primer circuito también cambiara en el segundo induciendo una FEM.

Si solo tenemos en cuenta un conductor y hacemos pasar una corriente este generará un campo magnético, al variar la corriente el campo magnético también lo hará. De lo anterior se puede entender que cualquier conductor que por el pase una corriente variable tendrá una FEM inducida por su propio campo magnético, a esto le llamamos FEM auto inducida.

Una FEM auto inducida siempre se opone al cambio en la corriente que causo la FEM, y de ese modo hace más difícil que haya variaciones en la corriente. Por esto se utilizan cuando hay una corriente variable. este efecto se presenta naturalmente en los circuitos con una espira cerrada donde se conduce corriente, pero esto aumenta considerablemente si el circuito incluye N espiras de alambre, esto genera una corriente i , que crea un flujo ϕ_B a través de cada espira de la bobina. Young et al. (2009)

$$L = \frac{N\phi_B}{i} \quad (5)$$

Para las inductancias planeares necesitamos dar con una forma de calcular bobinas con núcleo de aire la aproximación de Wheeler nos da la posibilidad de calcular esto, teniendo en cuenta que la inductancia (L), la media del radio (r), el número de vueltas (n) y la anchura (w) con esto tendremos la fórmula: Flowers et al. (2017)

$$L = \frac{r^2 n^2}{8r + 11w} \quad (6)$$

citando el marco teórico: Hou et al. (2019) Multi3D (2016) Espalin D. and Wicker (2014)

6.2 Antecedentes Históricos

Para la realización de este trabajo se tendrá en cuenta los siguientes artículos:

- En el 2019 varios investigadores TAO HOU, JUN XU, WILLEMIJN S. ELKHUIZEN, CHARLIE C. L. WANG, JIEHUI JIANG, JO M. P. GERAEDTS , y YU SONG publicaron un artículo acerca de cómo se puede utilizar diferentes formas de bobinados circulares en espiral hechos con impresión 3D para generar transmisión inalámbrica de energía "Design of 3D Wireless Power Transfer System Based on 3D Printed Electronics".
- En la conferencia internacional número 29 de automatización Flexible y mano factura inteligente, los investigadores Nebojsa I. Jaksica, y Pratik D. Desai describieron la creación de capacitores con el uso de un filamento fundido conductor, en esta conferencia se mostraron diferentes formas en las que se podía configurar un capacitor cambiando diferentes propiedades del mismo "Characterization of 3D-printed capacitors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament"
- Departamento de química, universidad de Duke EE.UU. los investigadores: Patrick F. Flowers, Christopher Reyes, Shengrong Ye, Myung Jun Kim y Benjamin J. Wiley. publicaron un artículo que trata acerca de la electrónica impresa en 3D usando fabricación de doble filamento, con esta técnica lograron obtener varios componentes tanto resistencias, condensadores e inductancias. Además de comparar tres diferentes materiales como el carbon-black, graphene, y cobre; para crear el conductor "3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament".
- Un caso interesante de uso para la impresión 3D es el artículo publicado por Lee Harle , Yuxiao He y John Papapolymerou en donde se estudia la posibilidad de hacer una antena Yagi-Uda para un radar automovilístico funcionando a 77GHz "3D Printed 77 GHz Planar Yagi-Uda Antenna". Harle et al. (2017)

7 Métodos de fabricación

En este documento se describen tres métodos de fabricación con el fin de crear circuitos RLC: la fabricación aditiva o impresión 3D, la impresión con tinta conductora y la sustracción de material conductor. Cada una de estas técnicas ofrece ventajas particulares dependiendo de los requerimientos del diseño, el material utilizado y la aplicación final del circuito.

7.1 Fabricación aditiva

Es un proceso de fabricación que consiste en crear objetos tridimensionales desde un modelo creado por computador, este objeto se obtiene añadiendo capas una encima de otra *fig 1*. Esta forma de fabricación ha abierto la posibilidad de crear y desarrollar electrónica en 3D, para esto se empleara la impresora M3-ID 3D Printer. una técnica de fabricación que tiene la posibilidad de crear formas 3D complejas nos da nuevas posibilidades.

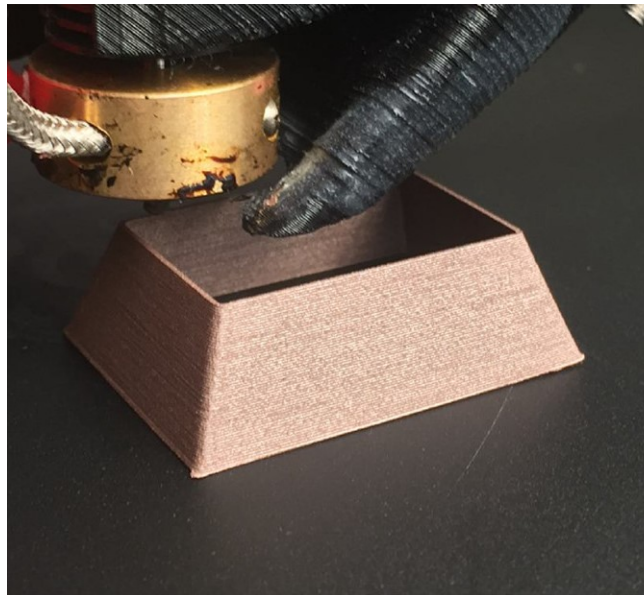


Figura 1

Pirámide hueca que podría utilizarse como antena. Fuente: Flowers et al. (2017)

7.1.1 *Etapas del proceso*

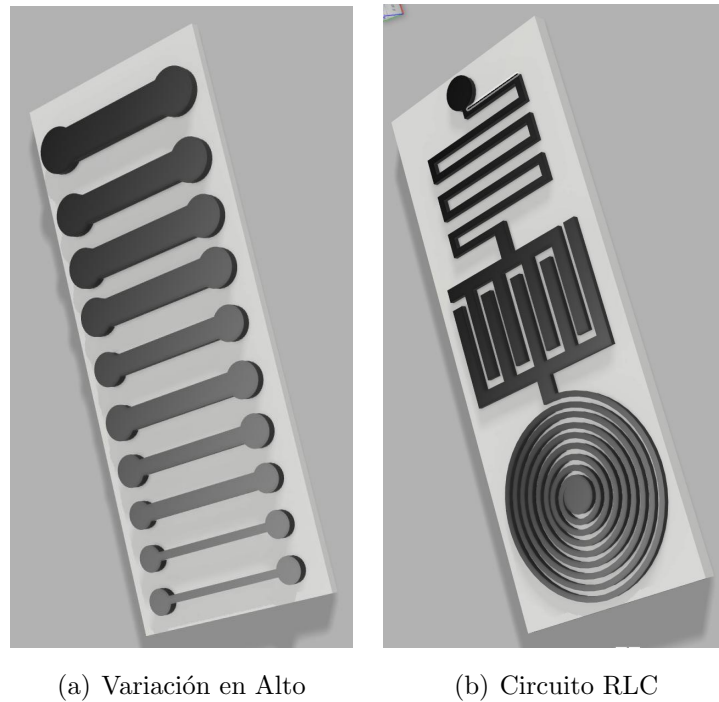
- Diseño del modelo: se utiliza el software Fusion 360 para crear el modelo del circuito 3D *fig 2(a)* y *fig 2(b)*.
- Preparación de la impresora: se debe calentar previamente la base de la impresora en una temperatura de 220°C para lograr una buena adhesión y trabajo de la máquina.
- Impresión: en impresora M3-ID 3D Printer va a ir colocando capa por capa de material creando el circuito con los dos filamentos.
- Post-procesado: después de terminar la impresión se pueden dar acabados con un bisturí.
- Pruebas: por último, se hacen las mediciones con el multímetro y el analizador de impedancias.

7.1.2 *Ventajas:*

Podemos obtener diseños más complejos y que con otros métodos no podríamos conseguir, por otra parte, permite reducir el desperdicio de materiales que se generarían con métodos de sustracción, y facilita la fabricación de dispositivos compactos.

7.1.3 *Desafíos:*

La resolución de los componentes que podemos crear está sujeta a la impresora, las boquillas y el material que deseamos emplear, limitación que no está presente con otros métodos de fabricación.

**Figura 2**

Diseño en Fusión 360. Fuente: Autor

7.2 Sustracción de material

La técnica de sustracción de material es la técnica más conocida y ampliamente utilizada en electrónica esta puede emplearse con diferentes técnicas, en este documento se hace referencia a la fabricación de circuitos utilizando una fresadora CNC sobre una placa de cobre.

7.2.1 Etapas del proceso

- Diseño del circuito: se diseñan el circuito y las pistas en Fusion 360 luego serán dadas al CNC Nomad3 *fig 3*.
- Preparación de la placa: se debe limpiar la pcb con Alcohol Isopropílico y asegurado a la base del CNC.

- fresado: la impresora CNC Nomad3 antes de empezar realiza una auto calibración de punta, luego retira el material sobrante, dejando los caminos conductores.
- Acabado y limpieza: se limpian los restos de material conductor con un cepillo y con Alcohol Isopropílico.
- Pruebas eléctricas: por último, se hacen las mediciones con el multímetro y el analizador de impedancias.

7.2.2 Ventajas:

La impresora CNC permite crear diseños complejos, personalizados y de manera rápida. Otra ventaja es la sencillez de este método que no requiere curación o procesos complejos y por ultimo al usar cobre directamente podemos aprovechar una mayor conductividad.

7.2.3 Desafíos:

Para este método de fabricación la resolución con la que se sustrae el material puede ser menor que con otros métodos además de estar limitada por el tamaño de la fresa, otra desventaja es la limitación que tenemos en cuanto al número de capas que se pueden usar.



Figura 3

Imagen impresora CNC. Fuente: Autor

7.3 Impresión de tinta conductora

La fabricación de prototipos con impresión de tinta conductora es una técnica reciente para crear circuitos mediante la deposición de tintas conductoras sobre un sustrato flexible o rígido. Estas tintas están compuestas por nanopartículas de metales conductores, como plata, cobre o carbono, suspendidas en un solvente que se evapora tras la impresión, dejando una traza conductora sobre la superficie.

7.3.1 *Etapas del proceso*

- Diseño del circuito: el diseño a implementar se crea el programa kiCad donde se dará forma a las pistas conductoras luego utilizado el software de la empresa BotFactory se envía el diseño a la SV2 *fig 4*.
- Preparación del material y la tinta: se debe agitar el cartucho, limpiar con un paño limpio y suave los excesos de tinta, luego colocar el cartucho en el cabezal de la sv2 y por ultimo limpiara la superficie sobre la que se va a imprimir con un paño.
- Impresión de la tinta: sobre el material aislante se aplica la tinta conductora mediante la técnica de inkjet.
- Secado y curado: en esta etapa se debe dejar el prototipo sobre la impresora ya que esta actúa como una plancha de calor esto para evaporar el solvente.
- Pruebas eléctricas: por último, se hacen las mediciones con el multímetro y el analizador de impedancias.

7.3.2 *Ventajas:*

Usando la impresión de tinta conductora podemos elegir el material sobre el cual se va a imprimir pudiendo ser este plástico o polímero flexible. Otra ventaja es la capacidad de crear diseños más complejos y evitando el desperdicio de material de los posesos sustractivos. Por ultimo con este método de fabricación se puede elegir el número de capas de tinta a emplear lo que nos da otras posibilidades.

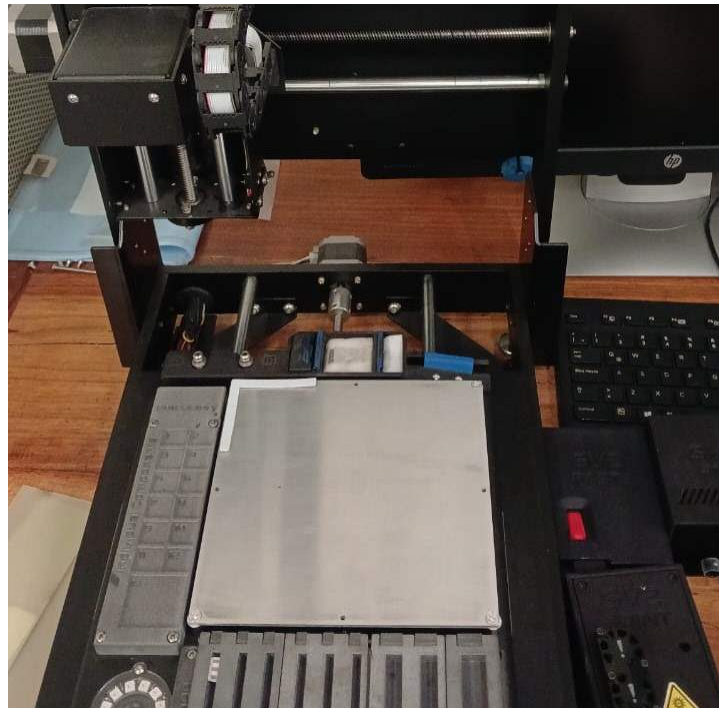


Figura 4

Imagen SV2 impresora de tinta. Fuente: Autor

7.3.3 Desafíos:

Nos encontramos con varias dificultades; la temperatura y la forma en la que se aplica la tinta pueden dar lugar a errores en la impresión, además de esto las propiedades de la tinta hacen que la conductividad sea menor que la del cobre.

8 Metodología del trabajo

De acuerdo a los objetivos de planteo realizar las siguientes tareas: En primer lugar, se hizo una revisión exhaustiva del estado del arte buscando documentos o información relevante para la investigación y el buen desarrollo de este proyecto. Luego de esto se utilizará esta información para crear un análisis comparativo en donde se busca encontrar las similitudes, diferencias y patrones. El siguiente paso será realizar la toma de datos primero para conocer y entender el funcionamiento de los instrumentos de medición para luego realizar mediciones sobre los circuitos RLC diseñados y fabricados para posteriormente analizar los datos obtenidos. Por último, se sacarán las conclusiones obtenidas del análisis anterior mente hecho en base a los datos obtenidos.

8.1 Estudio del Estado del Arte

En la revisión de la literatura se busca información referente a los circuitos RLC dentro de esta información se tendrá en cuenta la permitividad, la capacitancia, la auto inductancia y la resistividad de los diferentes circuitos RLC. Además de esto se debe de tener conocimientos de respuesta en frecuencia buscando entender y dar sentido a los datos obtenidos con un analizador de impedancias.

8.2 Trabajo Desarrollado

En un primer momento se tomaron muestras de resistencia, fabricados con impresión 3D Y con el CNC, de este se tomaron varias medidas de resistencia con un multímetro. Posterior mente se realizaron mediciones con el analizador de impedancias, utilizando un barrido de frecuencia a las muestras con los tres métodos de fabricación.

9 Equipos de Medición

9.1 Caracterización Rigol DM3058E

Para las mediciones se utilizó un multímetro Rigol DM3058E es un multímetro de 5 1/2 dígitos con función para medir voltaje, corriente, capacitancia, frecuencia. Clasificación: CAT I 1000 V, CAT II 600 V.

Testing Method	4-wire resistance or 2-wire resistance optional For current source
Open-circuit Voltage	P/F in $< 8\text{ V}$
Maximum Lead Resistance	10 % of ranges, on the range of $200\ \Omega$, $1\text{ k}\Omega$, for each lead $1\text{ k}\Omega$, on all other ranges, for each lead
Input Protection	1000 V, on all ranges

Tabla 2

Características internas del Rigol DM3058E. Fuente: RIGOL TECHNOLOGIES, (2020)

9.1.1 Puntas de Medición

Las puntas usadas en estas mediciones son puntas de multímetro rigol, miden un metro con un parámetro de seguridad CAT I 1000 V / CAT II 600 V 10A. cuenta con silicona de aislamiento, el tipo de entrada es through hole, son sondas de propósito general tabla 2.

Técnica de medición de dos puntas, en donde la forma sencilla de medir el valor de resistencia es midiendo Voltaje y Corriente, utilizando la ley de Ohm. El multímetro envía un voltaje hacia la resistencia dando lugar a una corriente, se mide la corriente y por tanto la resistencia. RIGOL TECHNOLOGIES, (2020)

9.2 BK precision 891

El medidor LCR BK precisión 891 tiene la capacidad de medir Inductancias, Capacitancias y Resistencias de un dispositivo electrónico en el cual es esencial conocer este, se puede dar en corriente continua o en un rango de frecuencias de 20 Hz a 300 kHz.

9.3 Caracterización Agilent 4294A

Con el propósito de obtener los datos para caracterizar los componentes utilizaremos el analizador de impedancias de precisión HP-Agilent 4294A *fig5* circuitos electrónicos. Este equipo cuenta con un rango de frecuencia de 40 Hz a 110 MHz, un rango de 5 *mV* a 1 *Vrms* y de 200 μA a más o menos 100 *mA*. Agilent Technologies, (2008)

Este es un dispositivo que nos permite realizar un análisis en frecuencia a través de un barrido de frecuencia, esto con el fin de caracterizar la forma en que se comporta el dispositivo. Además de permitirnos medir otras características del elemento además de solo capacitancia, inductancia y resistencia. Una de las ventajas de usar un analizador de impedancias como el Agilent 4294A es la posibilidad de obtener una gráfica de Angulo θ y fase Z .

los ingenieros encontramos en el día a día con componentes electrónicos que utilizamos como elementos ideales, esto quiere decir elementos puramente resistivos en el caso de las resistencias, pero en el mundo real estos elementos tienen de componentes tanto resistiva, capacitiva e incluso inductiva, esto para cuando el componente trabaja en una frecuencia deferente de cero.

Esto puede ser por su fabricación o su composición interna, generando que los valores de estos componentes varié y se aleje del resultado esperado, dependiendo de crear modelos algo complejos esto con el fin de acercarnos al comportamiento del componente real. Es por esto que es necesario cuando se está creando un componente electrónico conocer su comportamiento en un amplio rango de frecuencias y también ver directamente su respuesta tanto en Angulo θ como en fase Z .

9.3.1 Puntas de Medición

Técnica de medición se usó la medición de cuatro puntas en donde se utilizan cuatro electrodos, esto tiene como fin simplificar la medición. estos aparatos tienen dos circuitos medir con un amperímetro la corriente de la fuente de alimentación, el otro tiene un voltímetro en paralelo con una resistencia que no conocemos, este tiene una resistencia muy grande por lo que por el pasa una corriente muy pequeña. Además, la resistencia de los cables genera una caída de tensión despreciable.

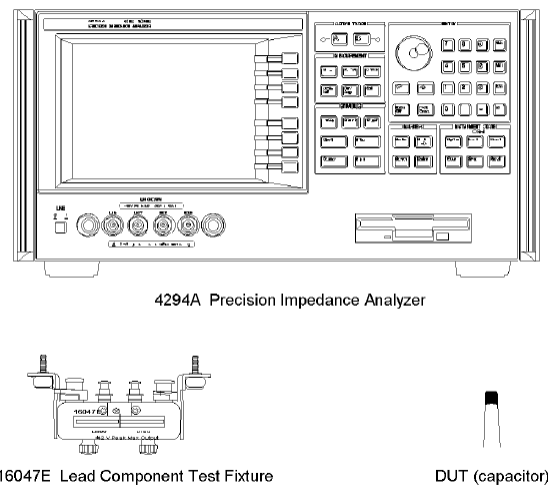


Figura 5

Analizador de impedancias Agilent 4294A. Fuente: Agilent Technologies, (2008)

10 Descripción de Muestras

10.1 Fabricación Aditiva

Los filamentos destinados a la impresión por fabricación por filamento fundido (FFF) se categorizan fundamentalmente en dos grupos:

- Trazas Metálicas: Incorporan cantidades mínimas de partículas metálicas, generalmente para fines estéticos o funcionales específicos.
- Elevada Carga Metálica: Contienen altos porcentajes de partículas metálicas de escala micro-métrica, diseñados para conferir propiedades mecánicas, eléctricas o térmicas avanzadas.

Los polímeros que constituyen la base de estos filamentos abarcan un espectro de materiales termo-plásticos específicos, entre los cuales se incluyen Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Poliamida (PA), Policarbonato (PC), Ácido poliláctico (PLA), Nailon, Polietileno tereftalato (PET) o Polietileno tereftalato glicol-modificado (PETG). La selección del polímero base determina las propiedades mecánicas, térmicas y de procesamiento del filamento. Ngo et al. (2018) & Singh et al. (2020)

La composición de los metales presentes en los filamentos comerciales exhibe una notable variabilidad, influenciada por factores como el color del producto o su aplicación específica. Dicha variabilidad responde a criterios de diseño y funcionalidad establecidos por los fabricantes.

a adición de partículas metálicas a los filamentos persigue múltiples objetivos, que pueden incluir, entre otros, la mejora de la conductividad térmica, la resistencia mecánica, la apariencia estética o la funcionalidad específica. No obstante, los fabricantes no siempre divulgan de manera explícita las razones subyacentes a estas incorporaciones. Tedla et al. (2022)

En el diseño de estos prototipos se empleó un filamento conocido como electrifi para la fabricación tanto de resistencias como de los distintos dispositivos. este tiene una resistividad de $0,006 \Omega$.

Este proceso de fabricación viene con un problema, la densidad de los objetos pro-

ducidos no es uniforme, la calidad de la adhesión entre capas dentro de este puede cambiar para los que son fabricados con impresión 3D. Por otro lado, el resultado de la extrusión no es uniforme y se pueden romper durante este proceso, esto hace variar la conductividad eléctrica del material. debemos tener esto en cuenta para los futuros diseñadores que utilicen la impresión FFF. Estos dispositivos fueron diseñados con el software Fusión 360.

De este método solo se tienen dos tipos de muestras una puramente resistivas y la que forma un circuito RLC.

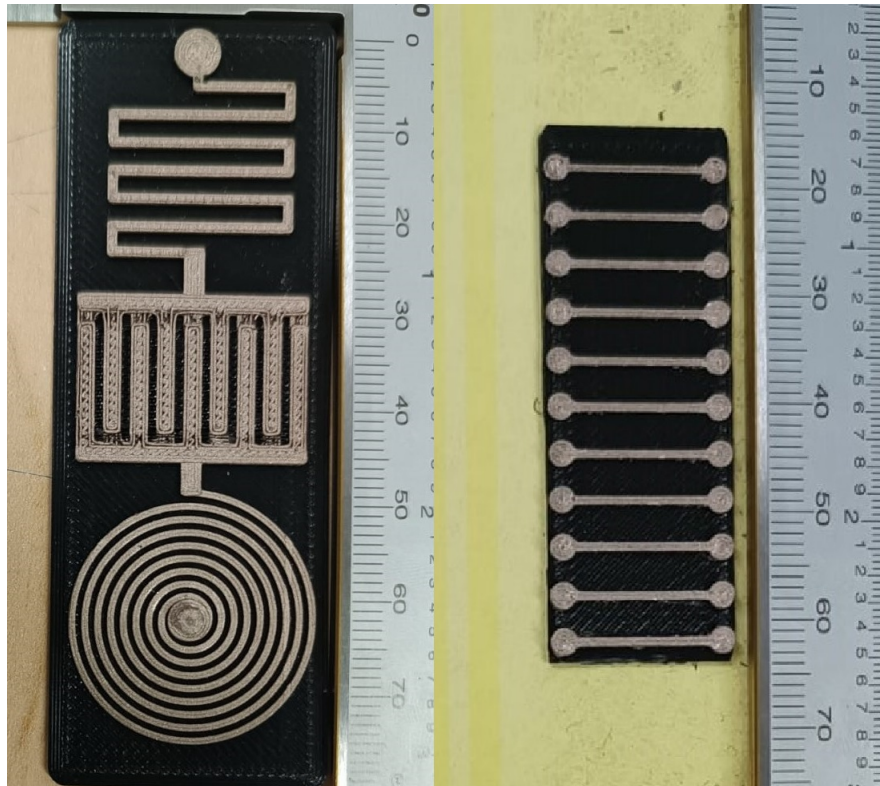


Figura 6

Fabricación aditiva. Fuente: Autor

10.2 Fabricación CNC

Con este método de fabricación se utilizaron láminas de cobre sobre un aislante (baquelita) las mismas que normalmente se utilizan para hacer circuitos impresos. En este caso para sustraer el material se utiliza una maquina CNC. Con este método de fabricación tendríamos 9 resistencias.

Para este método se tienen dos muestras, uno con un circuito RLC, además de las muestras con resistencias antes mencionadas.

10.2.1 Diseño en Software CNC

En un primer momento se debe crear un dibujo vectorial denominado (CAD) 3D. esto lo podemos hacer según criterios como las dimensiones y la forma. después de esto se genera un archivo compatible, como puede ser STEP o IGES.

Por lo general, estas herramientas de software utilizan un código específico con el nombre de G. este controla desde el movimiento hasta donde arrancar y donde parar.

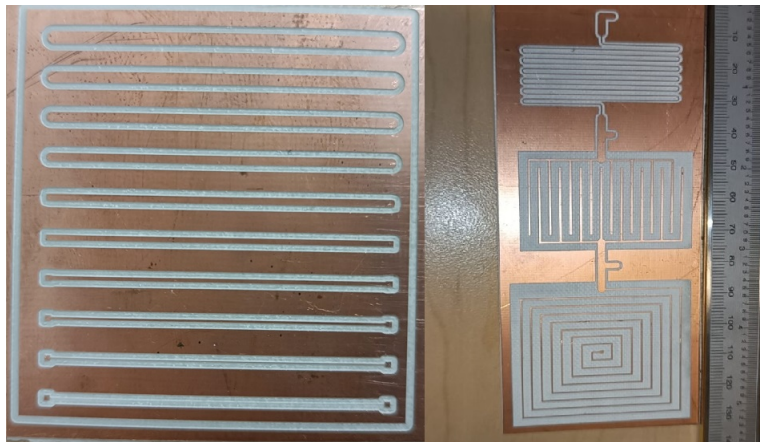


Figura 7

Fabricación CNC. Fuente: Autor

10.3 Fabricación SV2

Con la impresora térmica de chorro para pcb BotFactory SV2 es posible la crear sensores, y su cableado pudiéndose integrar en micro-sistemas completamente funcionales, pudiendo incluir desde baterías, microcontroladores componentes pasivos, antenas, entre otros. Ivy et al. (2022)

Para la fabricación de estas muestras, se emplea una placa de material aislante sobre el cual se imprime una tinta conductora con partículas de plata esto con el fin de crear circuitos con la forma que se desea, posteriormente se debe dejar secar, de este experimento solo se tiene una muestra con un circuito RLC.

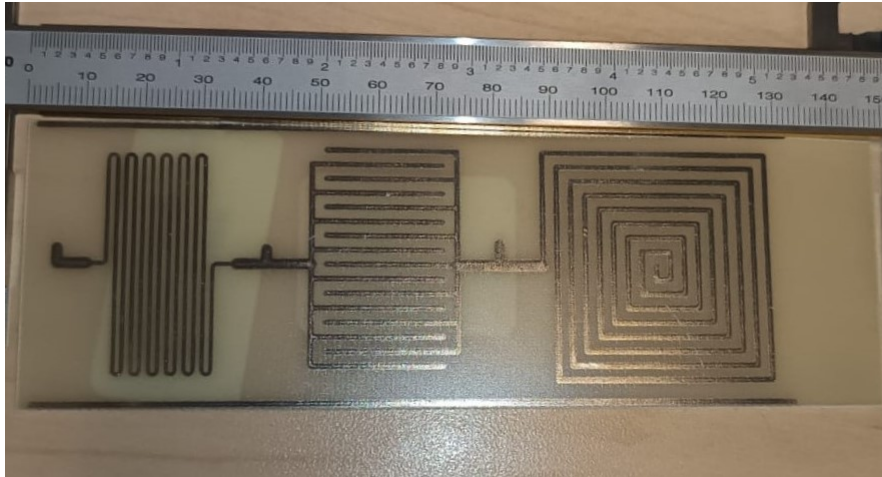


Figura 8

Fabricación FR4. Fuente: Autor

11 Experimentos Realizados

Durante el desarrollo de los experimentos se buscó el análisis de los componentes electrónicos los cuales son la resistencia, la inductancia y la capacitancia, buscando observar su comportamiento. Por un lado, las diferentes medidas de resistencia pueden utilizarse para comprender la impedancia de los materiales y la relación entre tensión, corriente y resistencia. Otra cosa que podemos evidenciar es como los cambios de temperatura, de forma y las propiedades de los materiales afectan al comportamiento de las resistencias.

Alto	Teorico (Ω)	R Media (Ω)	tolerancia (Ω)
24/08/2022			
0.1 mm	36393103.4	32669833.3	141.573918
0.23 mm	12969993.9	29558233.3	114.557767
0.33 mm	7806958.47	132311.102	20.9029246
0.47 mm	5478595.23	17386362.8	36.9430271
0.54 mm	4831978.32	8602.12	28.3599961
0.61 mm	4110318.23	851938.673	20.1111008
0.72 mm	3380681.82	9651.83833	25.7257763
0.77 mm	3311688.31	86662.4048	20.3955886
0.83 mm	2964686.33	195574.041	20.634832
0.91 mm	2744697.16	3846.30167	25.1462966
1.11 mm	2171879.74	8324.97	127.481222
26/08/2022			
0.13 mm	24551090.7	45605333.3	137.234565
0.27 mm	11365079.4	595653.333	78.0543204
0.31 mm	9677419.35	367.648167	67.6194458
0.45 mm	6167965.37	804.803333	156.699485
0.55 mm	4736911.28	1037.50833	195.285271
0.62 mm	4304032.26	819.878333	263.956065
0.75 mm	3320930.23	3897.03333	80.336847
0.9 mm	2727969.35	1211426.91	20.0170572
1 mm	2515764.71	35820666.7	123.240478
1.04 mm	2390876.57	2611.7325	42.4260281
1.17 mm	1942240.22	2133.47833	34.6798683

Tabla 3

Resistencias FA Variación Alto. Fuente: Autor

Ancho	Teorico (Ω)	R Media (Ω)	tolerancia (Ω)
26/08/2022 [15:04]			
0.93 mm	4751753.16	101893980	21.3826688
1.26 mm	3213333.33	16300526.2	23.2600579
1.47 mm	2995563.44	5012911.55	20.1986207
1.83 mm	2330601.09	10876.205	26.3156519
2 mm	2008235.29	826.404	99.5648277
2.36 mm	1793432.2	561.166667	205.177268
2.59 mm	1744144.14	447.6035	111.068831
2.73 mm	1601528.91	943.418333	186.637498
3.23 mm	1144947.93	6595.36167	72.7616449
3.57 mm	1210084.03	1040.99	157.066554
26/08/2022 [16:00]			
0.87 mm	5004497.75	233334.908	48.8910255
1.12 mm	3763975.16	767.535	110.607775
1.41 mm	3121184.09	725.1405	113.80653
1.66 mm	2791347.21	725.656833	65.6463501
1.97 mm	2342408.86	799.26	94.0947941
2.3 mm	1966376.81	742.905	186.175398
2.59 mm	1733848.13	943.628333	143.05238
2.89 mm	1576910.98	1606.23667	52.132543
3.18 mm	1449399.66	753.57	291.471339
3.48 mm	1266973.96	690.855	211.370833

Tabla 4

Resistencias FA Variación Ancho. Fuente: Autor

Adicionalmente, los circuitos RLC pueden ser estudiados para analizar sus características como resonancia, filtrado y respuesta transitoria. Esto a través de la impedancia total, la frecuencia de resonancia y la forma en la que estos circuitos responden a señales de entrada. Además, analizando los diagramas de bode podemos evaluar la estabilidad y el comportamiento en frecuencia de estos circuitos.

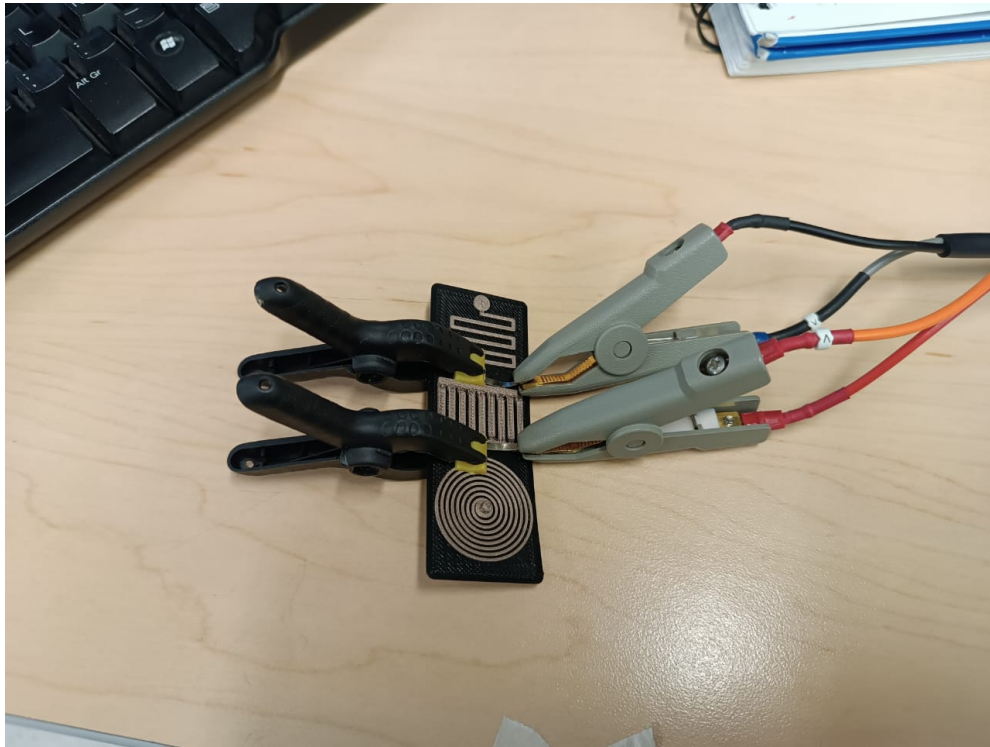
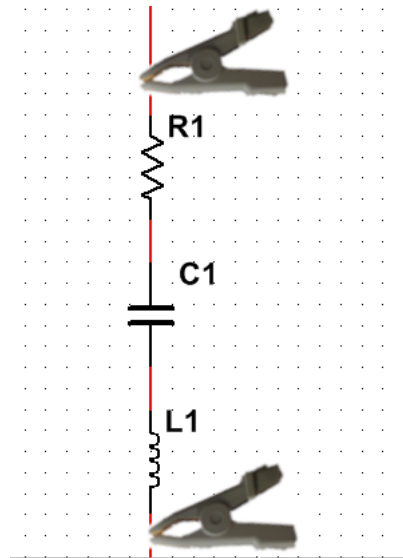


Figura 9

Método de Medición. Fuente: Autor

11.1 Método de medición

Para la toma de medidas de las muestras se buscó un método que permitiera la medida con el analizador de impedancias, ya que este requería del uso de medición de 4 puntas para esto se utilizaron 2 láminas metálicas con un par de pinzas *fig 9* estas se colocaron en los extremos del circuito RLC este conformando una topología serie *fig 10*, con esto las muestras hacen contacto con las 4 puntas de medición.

**Figura 10**

Configuración Circuito. Fuente: Autor

Componente	Valor teórico	Valor Medido
R1	470	469
R2	4,700	4,802
R3	47,000	47,924
R4	4.7	4.74

Tabla 5

Mediciones resistencias comerciales. Fuente: Autor

11.2 Mediciones comerciales

En un primer momento, se tomaron medidas de resistencia comerciales con un multímetro con esto se busca partir de una base para los valores de las muestras a analizar. Con esto se profundiza los conocimientos acerca de los implementos de medición y cómo funcionan. Los valores obtenidos se muestran en la tabla *fig 5*.

Componente	Teorico (Ω)	R Media (Ω)	tolerancia (Ω)
0.23 mm	0.06441412	0.7225	3074.46809
0.35 mm	0.0417024	0.47216667	5345.28302
0.68 mm	0.02177576	0.46566667	5373.07692
0.80 mm	0.0184884	0.43533333	2968.18182
1 mm	0.0148344	0.39983333	3690.76923
1.21 mm	0.01234036	0.37033333	5847.36842
1.40 mm	0.0106968	0.349	2326.66667
1.60 mm	0.0093744	0.3445	2995.65217
1.77 mm	0.00854617	0.33633333	2882.85714

Tabla 6

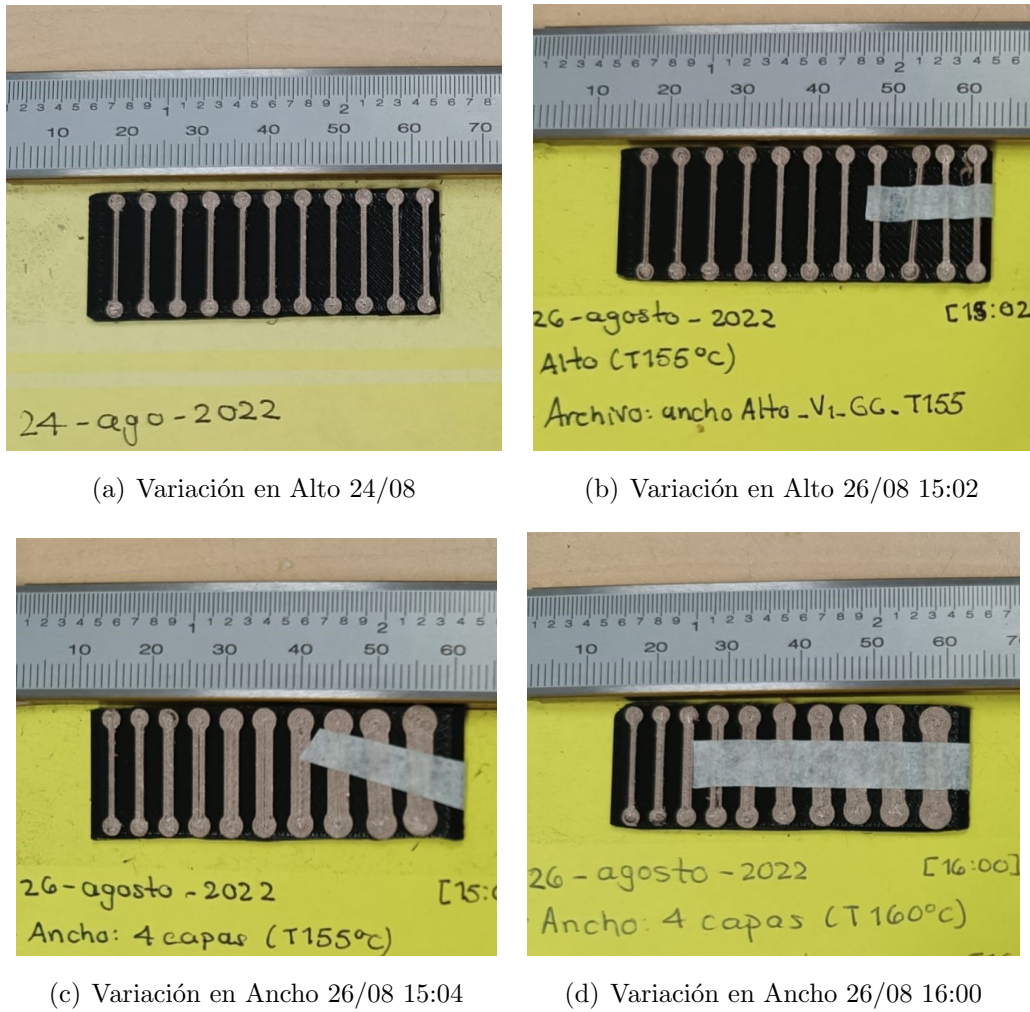
Mediciones resistencias Fabricación CNC. Fuente: Autor

11.3 Mediciones Muestras

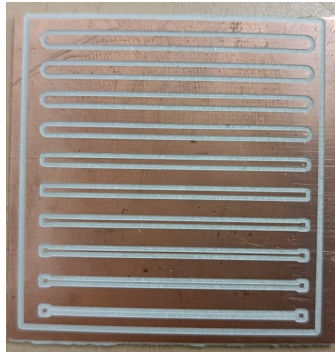
Después de realizar las medidas con resistencias comerciales, se realizaron las medidas para las resistencias con fabricación aditiva de estos surgieron dos tablas 3 & 4, la primera tabla corresponde a las figuras *fig 11(a)* & *fig 11(b)* estas dos representan a una variación en el alto del material y fueron fabricadas con dos días de diferencia. Por otro lado, la segunda tabla 4 corresponde a las figuras *fig 11(c)* & *fig 11(d)* en estas existe una variación en el ancho y fueron fabricadas el mismo día con una hora de diferencia.

En la última tabla tenemos los valores de las resistencias creadas en CNC tabla 6 en este caso solo tenemos variación del ancho como podemos ver en la figura *fig 12*.

Cada foto tiene una gráfica de resistencia y de tolerancia, los títulos en cada pie de foto son los mismos para las gráficas de resistencia y tolerancia, corresponden a cada uno.

**Figura 11**

Resistencias FA. Fuente: Autor

**Figura 12**

Resistencias CNC. Fuente: Autor

11.4 Medición de circuitos RLC Pruebas

Para las mediciones de los circuitos RLC tenemos los datos obtenidos con el analizador de impedancias Agilent 4294A. En este, podremos observar la respuesta en frecuencia de los circuitos de los tres métodos de fabricación. Para poder llevar a cabo estas mediciones por el método de cuatro puntas se buscó un método para poder hacer contacto con los extremos del circuito recurriendo a dos laminas metálicas y dos pinzas como se ve en la *fig 9*, con esto podemos visualizar una gráfica como la que observamos en la *fig 13*.

Componente						Valor teórico	Valor Medido
Capacitancia	k	A	n	E0	d		
C 3D	1.28m	44.5cm ²	1	8.85p(F/m)	1mm	5.04126pF	5.041pF
C CNC	0.537	7.81cm ²	1	8.85p(F/m)	1mm	37.5407pF	38.6pF
C FR4	0.194μ	65.6cm ²	1	8.85p(F/m)	1mm	10.6219pF	11.38pF
Inductancia	r	n		w			
L 3D	0.08mm	8		5mm		7.48996μH	6.374μH
L CNC	0.003mm	8		5mm		990.986nH	1.0432nH
L FR4	0.0053mm	8		5mm		3.22665μH	4.6532μH

Tabla 7

Mediciones capacitancia e inductancia. Fuente: Autor

De las imágenes podemos obtener los valores de capacitancia e inductancia, utilizando la formula (4) y la formula (4) podemos obtener los valores teóricos usando las medidas físicas de los componentes mostrados en la tabla 7.

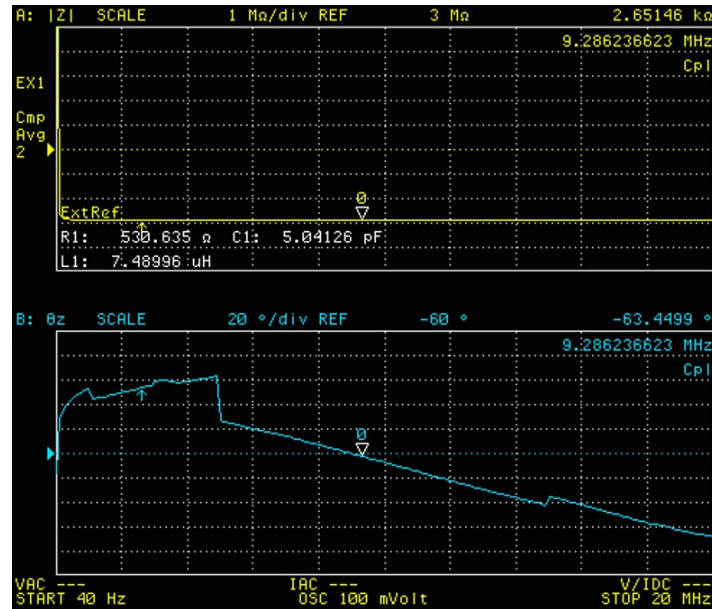


Figura 13

Gráfica obtenida Circuito RLC. Fuente: Autor

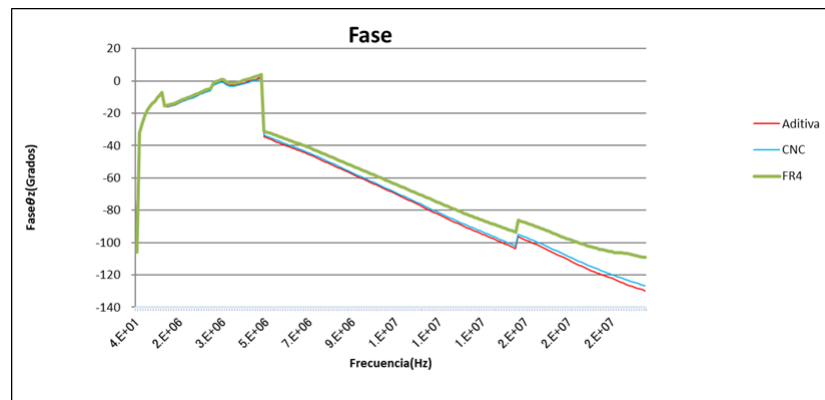
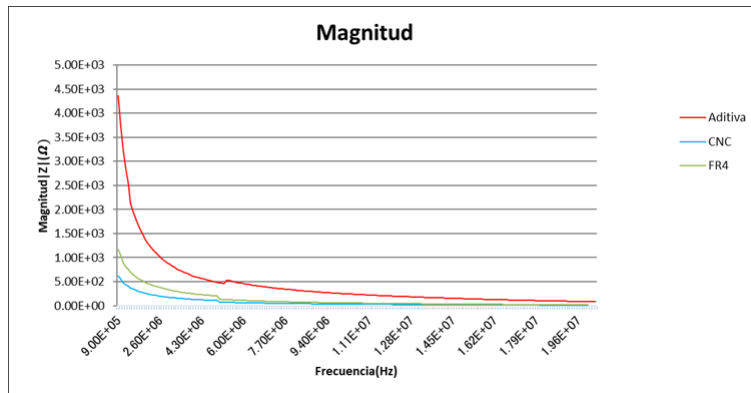


Figura 14

Gráfica obtenida Fase. Fuente: Autor

**Figura 15**

Gráfica obtenida Magnitud. Fuente: Autor

12 Análisis en Frecuencia

En la figura [fig13](#) se muestra la imagen que nos entrega en Agilent 4294A en él se pueden observar las gráficas de Angulo θ y fase Z .

Las mediciones tomadas con el analizador de impedancias se realizaron con un rango de frecuencias de 40 Hz a 20 Mhz, se obtuvieron 200 datos de magnitud y fase además de una tensión aplicada de 100 mV. En las figuras [fig 14](#) y [fig 15](#) cada uno de los métodos de fabricación se muestra con un color diferente la fabricación aditiva se muestra en rojo, la fabricación en CNC se muestra en azul y la fabricación en FR4 se muestra en verde. De las gráficas podemos inferir que la impedancia de los circuitos impresos tiene una frecuencia critica entre 48 Hz y 52 Hz.

el funcionamiento de un analizador de impedancias busca medir la relación entre voltaje y corriente, con esto el aparato de medición logra inferir el ángulo.

para determinar la impedancia se utiliza:

$$Z = V/I \quad (7)$$

además, el analizador mide el ángulo de desfase θ el cual se da entre el voltaje y la corriente, combinando ambos se puede determinar la impedancia compleja con la fórmula:

$$Z = |z| - e^{j\theta} \quad (8)$$

La frecuencia de resonancia, definida como el punto donde la magnitud alcanza su máximo absoluto y el ángulo de fase se anula (0°), constituye un parámetro crítico para el análisis del comportamiento dinámico del sistema. En este punto, el sistema exhibe la mayor amplitud de respuesta ante una señal de entrada, siendo un indicador fundamental de su desempeño.

Los márgenes de fase y magnitud son parámetros fundamentales para evaluar la estabilidad de un circuito RLC.

Cuando la magnitud de la componente inductiva y la magnitud de la componente capacitiva se igualan, la impedancia (Z) alcanza su valor mínimo, la diferencia entre las dos componentes es 0 igualando a la resistencia (R), y el desfase entre voltaje y corriente es 0 alcanzando la resonancia.

En el análisis de sistemas en régimen sinusoidal estacionario, se emplea la sustitución $s = j\omega$, donde j representa la unidad imaginaria. La corriente máxima en el circuito se manifiesta en la frecuencia de resonancia, punto en el cual la disipación de potencia en la resistencia alcanza su valor máximo. De igual forma, la respuesta en frecuencia facilita el análisis detallado de las tensiones en cada elemento del circuito, proporcionando una caracterización precisa de su comportamiento dinámico.

En particular, en un circuito RLC en serie, la impedancia total se expresa como

$$Z = R + j(\omega * L - \frac{1}{\omega * C}) \quad (9)$$

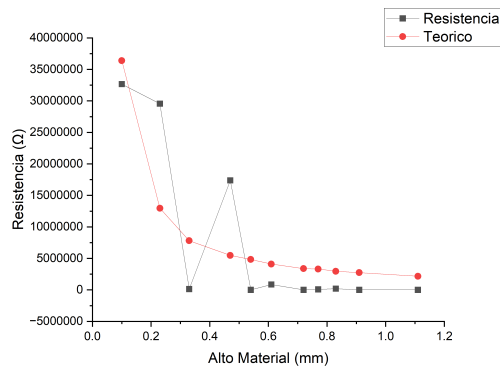
La frecuencia de resonancia se alcanza cuando las reactancias inductiva y capacitiva se igualan, es decir, cuando

$$\omega * L - \frac{1}{\omega * C} \quad (10)$$

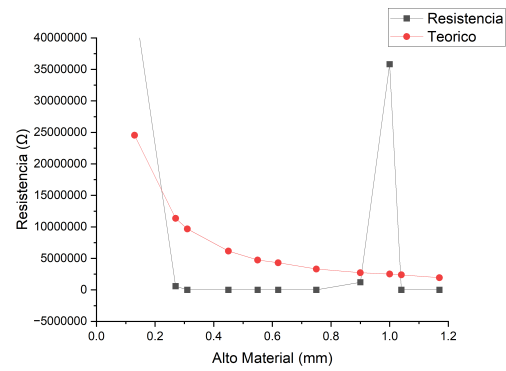
$$\frac{LC\omega^2 - 1}{\omega * C} \quad (11)$$

lo que da como resultado una frecuencia:

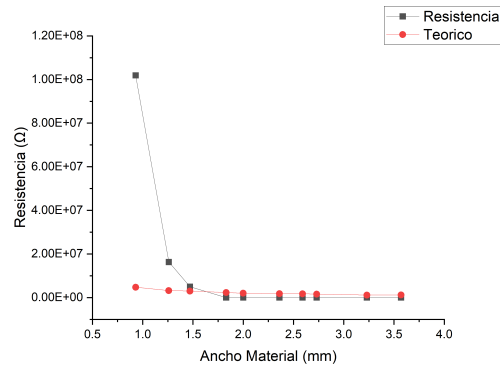
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12)$$



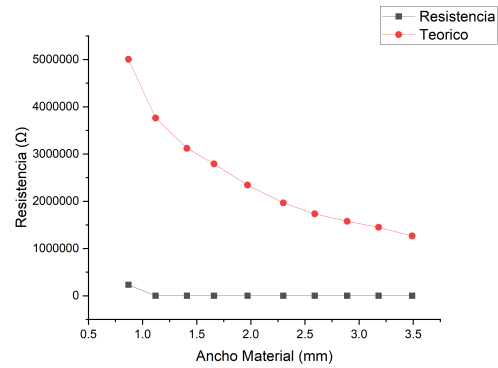
(a) Variación en Alto 24/08



(b) Variación en Alto 26/08 15:02



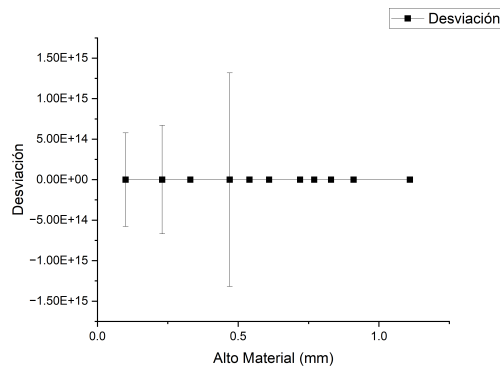
(c) Variación en Ancho 26/08 15:04



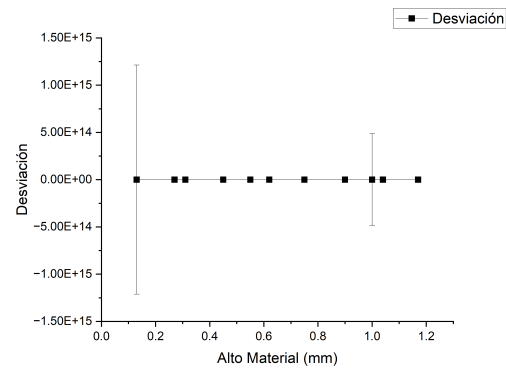
(d) Variación en Ancho 26/08 16:00

Figura 16

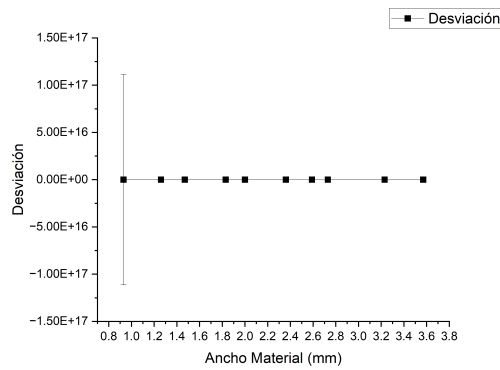
Gráficas Resistencia FA. Fuente: Autor



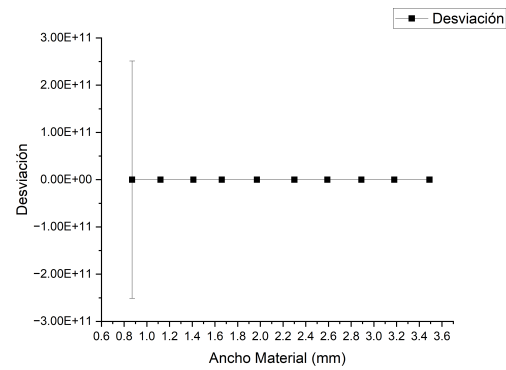
(a) Variación en Alto 24/08



(b) Variación en Alto 26/08 15:02



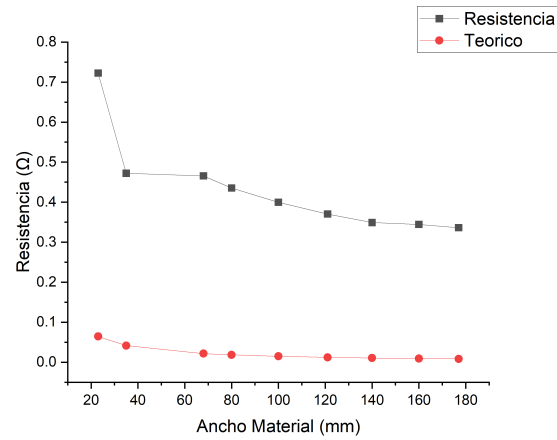
(c) Variación en Ancho 26/08 15:04



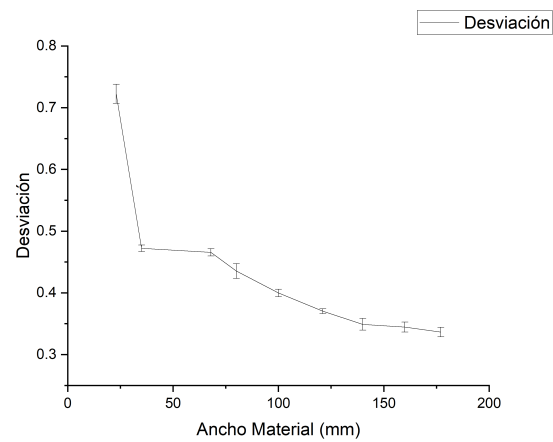
(d) Variación en Ancho 26/08 16:00

Figura 17

Gráficas desviación estándar. Fuente: Autor

**Figura 18**

Gráficas Resistencia CNC. Fuente: Autor

**Figura 19**

Gráficas desviación estándar CNC. Fuente: Autor

13 Comparación de los Circuitos

De los datos mostrados en la tabla 7 se puede observar que en los dispositivos predomina un elemento mayormente inductivo, esto se puede ver en las gráficas de fase fig 14 y magnitud fig 15.

En esta comparación se tuvo en cuenta las gráficas 16(a) a 16(d), primero tenemos en cuenta las resistencias FA en donde podemos ver una gran diferencia entre el valor obtenido y el valor esperable en la teoría, además de que de los datos tomados se calculó la desviación estándar, dando en algunos casos un valor tan alto que difícilmente se puede poner en el gráfico fig 17 y fig 19.

En las gráficas 16(a) y 16(b) se evidencia que las mediciones de variación en el alto tuvieron valores desde los 2k Ω y los 4M Ω mientras que en la gráfica 16(c) los valores de variación en el ancho van desde 400 Ω hasta los 100M Ω , para la gráfica 16(d) los valores van desde los 600 Ω hasta los 5M Ω .

Por otra parte, en la gráfica 18 podemos observar los datos del CNC estos se acercan más a lo esperable según el modelo teórico teniendo valores entre 0.34 Ω hasta 0.72 Ω .

Otra comparación que podemos ver se da con las gráficas 14 y 15 en estas gráficas podemos ver que el comportamiento de los 3 circuitos es similar actuando los tres como un pasa bajos, y la mayor diferencia en el comportamiento de estos circuitos se da en frecuencias altas.

14 Conclusiones

Poder realizar la revisión teórica permitió dar luz sobre los fundamentos físicos y teóricos del funcionamiento interno de los dispositivos electrónicos. Además de entender la forma en la se construían estos dispositivos anteriormente y como las nuevas tecnologías permiten nuevas formas de fabricación, con esto dando forma a este proyecto, como se evidencio en el capítulo Métodos de fabricación.

Tabla	Ventajas	Desventajas
Fb Aditiva	-El material tiene flexibilidad. -Permite un prototipo rápido. -La complejidad en los diseños. -Reduce cantidad del material.	-Demora en la fabricación. -Problemas entre las capas. -Resolución en la fabricación.
Fb CNC	-Componentes más precisos. -No requiere procesos adicionales. -Permite un prototipo rápido.	-Limitado número de capas. -Limitado ancho de pistas.
Imp Tinta	-Poder elegir material base. -La creación de diseños complejos.	-Se requiere de tiempo de curado. -Sensible a cambios de temperatura. -Menor conductividad.

Tabla 8

Tabla de ventajas y desventajas. Fuente: Autor

De la tabla 8 se concluyó que, entre los tres métodos de fabricación 3D evaluados, la fabricación por CNC tiene mayor precisión en la creación de componentes tridimensionales, mientras que la Fabricación Aditiva destacó por la creación de geometrías más complejas y la capacidad de definir el ancho de los elementos conductores.

Las mediciones realizadas sobre los circuitos fabricados permitieron determinar que los valores de inductancia, capacitancia y resistencia variaron en función del método utilizado. El método que logro acercarse mejor a los valores teóricos fue la fabricación por CNC, indicando una mayor adhesión en las propiedades eléctricas esperadas.

La comparación entre los diferentes circuitos fabricados mostró que la fabricación CNC logró la mayor precisión eléctrica, seguido por la impresión de tinta conductora, mientras que la fabricación aditiva, pese a permitir más complejidad en la geometría, presentó mayores variaciones en las propiedades eléctricas debido a tolerancias de fabricación más amplias.

Con base a los resultados obtenidos, se puede concluir que la fabricación CNC es el mejor para la fabricación de circuitos RLC planares cuando la prioridad es la precisión. Sin embargo, para circuitos que requieran flexibilidad de sus componentes, la impresión de tinta es la mejor opción para esta aplicación. La fabricación aditiva es recomendable en diseños donde la complejidad geométrica sea esencial para el funcionamiento del circuito. Se sugiere continuar optimizando las condiciones de fabricación de cada técnica para mejorar la repetitividad y la precisión en aplicaciones de alta frecuencia.

15 Trabajos Futuros

De los temas tratados en este trabajo, se podría profundizar en trabajos futuros como someter los circuitos a estrés mecánico para analizar el comportamiento de sus propiedades con un cambio en ese sentido.

Otra opción para continuar con este trabajo seria introducir los circuitos en agua u alcohol para observar los cambios en la permitividad del material, y en sus características eléctricas.

16 Estrategias de Divulgación

Para la divulgación de este trabajo de grado se consideran las siguientes:

- Seminario: se busca dar a conocer y mostrar los resultados en seminarios o conferencias, buscando visibilidad en el desarrollo de circuitos 3D planeares.
- Artículo Científicos: los resultados encontrados serán presentados en revistas científicas.
- Redes sociales: a través de distintas plataformas podemos dar a conocer las innovaciones que se encontraron en el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Agilent Technologies, (2008, 4). *Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer*. Agilent Technologies,. Rev. 1.
- Espalin D., Muse D., M. and Wicker (2014). 3d printing multifunctionality: structures with electronics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72, 1433–3015.
- Flowers, P. F., C. Reyes, S. Ye, M. J. Kim, and B. J. Wiley (2017). *3d printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament*. Additive Manufacturing 18, 156 – 163. Cited by: 263.
- Harle, L., Y. He, and J. Papapolymerou (2017). 3d printed 77 ghz planar yagi-uda antenna. In *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, (pp. 13–14).
- Hou, T., J. Xu, W. S. Elkhuizen, C. C. L. Wang, J. Jiang, J. M. P. Geraedts, and Y. Song (2019). Design of 3d wireless power transfer system based on 3d printed electronics. *IEEE Access* 7, 94793–94805.
- Ivy, L., V. Gund, B. Davaji, C. Ospina, D. Ni, P. Doerschuk, and A. Lal (2022). *Laser-induced graphene pressure sensors manufactured via inkjet pcb printer : Locally producing super-sensitive and cost-effective circular diaphragm pressure gauges*. In 2022 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), (pp. 1–4).
- Jaksic, N. I. and P. D. Desai (2019). *Characterization of 3d-printed capacitors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament*. Volumen 38, (pp. 33 – 41). Cited by: 7; All Open Access, Gold Open Access.
- Multi3D (2016). *Electrifi conductive 3d printing filament*. Excerpted from 5th edition of the APA Publication Manual.
- Ngo, T. D., A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui (2018). *Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering 143, 172–196.
- RIGOL TECHNOLOGIES, (2020, 6). *DM3058/DM3058E Data Sheet*. RIGOL TECHNOLOGIES,. Rev. 1.

Singh, S., G. Singh, C. Prakash, and S. Ramakrishna (2020). Current status and future directions of fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes* 55, 288–306.

Tedla, G., A. M. Jarabek, P. Byrley, W. Boyes, and K. Rogers (2022). Human exposure to metals in consumer-focused fused filament fabrication (fff)/ 3d printing processes. *Science of The Total Environment* 814, 152622.

Young, H. D., R. A. Freedman, A. L. A. L. Ford, V. A. Flores Flores, and A. Rubio Ponce (2009). *Sears - Zemansky física universitaria* (12 ed. ed.). México: Pearson Educación de México.