

# Avance 1, Prueba Ecostress

Natalia Hernández-López<sup>ID\*</sup> y Sebastián Cruz-Solano

\*Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 30101 Cartago, Costa Rica, {natihl1600, scruz100}@estudiantec.cr

**Resumen**—El informe desarrolla el proceso de investigación, análisis y diseño para el modelado de una aplicación de detección y corrección de errores, pre-procesamiento de señales y esquemas de modulación. Los datos provienen de una prueba de *ecostress*, los cuales deben ser pre-procesador y filtrados para emular su transmisión por un canal de ruido gaussiano.

**Palabras Clave**—

## I. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se busca la aplicación e integración de distintas áreas de conocimiento para el modelado de un sistema de radiofrecuencia con corrección y detección de errores, destinado a una aplicación médica, mediante un SoC nRF52832 de Nordic Semiconductor.

La finalidad de este proyecto es simular el flujo del procedimiento de recepción y procesamiento de datos para su posterior envío.

El desarrollo se llevará a cabo en dos etapas, en las cuales se trabajará en el diseño y desarrollo de los módulos y bloques necesarios para alcanzar el objetivo planteado. Además, se realizarán distintos análisis teóricos e investigaciones sobre ciertos componentes del proyecto.

Para el desarrollo se emplearán herramientas como MATLAB, EAGLE, Python, Jupyter Notebook y Git.

En este primer avance, se trabajó con el bloque de transmisión, que incluía el subbloque de preprocesamiento, en el cual se acondicionó la señal para luego proceder con la codificación utilizando Hamming. Asimismo, se realizó la modulación y la investigación de la antena.

Otro factor muy importante fue el diseño del modelo del canal de transmisión. Finalmente, se inició también con el bloque del receptor, implementando otro código de demodulación y decodificación.

## II. BLOQUE TRANSMISOR TX

### II-A. Prueba Ecostress

En esta primera etapa del bloque de transmisor TX se realizó un análisis estadístico de los datos de frecuencia cardíaca obtenidos durante la prueba de Ecostress. El objetivo de este es determinar si las pulsaciones por minuto (BPM) presentan una distribución normal y si existen valores atípicos en el conjunto de datos.

Para evaluar la distribución de la señal de BPM se aplicó la prueba de Anderson–Darling utilizando la biblioteca de Python `scipy.stats`. Para esto se estableció que la hipótesis nula ( $H_0$ ), afirma que los datos tienen una distribución normal, mientras que la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) plantea que no lo

hacen. Se utilizó un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  (5 %), debido a que es un valor comúnmente utilizado en análisis estadísticos.

El estadístico obtenido fue:

$$A^2 = 0.5773$$

y el valor crítico correspondiente a un nivel de significancia del 5 % fue:

$$A^2_{\text{crítico}} = 0.764$$

Como  $A^2 < A^2_{\text{crítico}}$ , no se rechaza la hipótesis nula. Por lo que, se concluye que los datos de frecuencia cardíaca sí siguen una distribución normal.

Además, se calcularon parámetros estadísticos como el promedio y la desviación estándar, respectivamente:

$$\mu = 129.15 \text{ BPM} \quad \sigma = 19.65 \text{ BPM}$$

La Figura 1 muestra el gráfico de probabilidad normal, el cual crea una función de distribución acumulativa (CDF) estimada a partir de su muestra graficando el valor de cada observación contra la probabilidad acumulativa estimada de la observación. [1] Se puede observar como los datos se ajustan a la recta normal, demostrando de forma visual que los datos tienen dicha distribución.

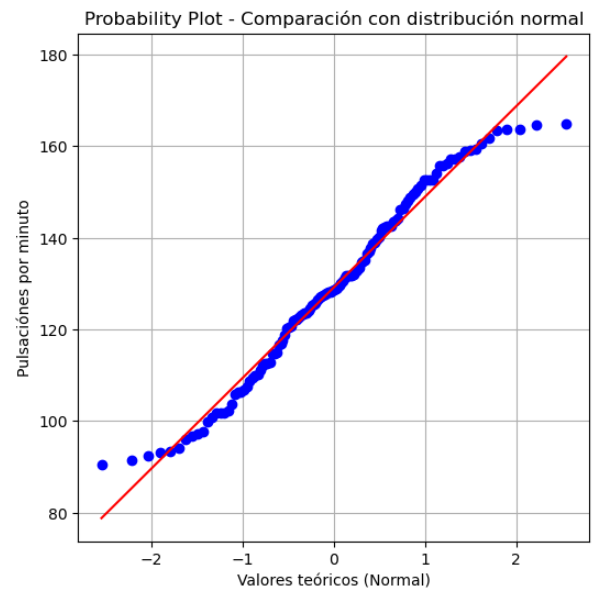


Figura 1. Gráfico de probabilidad normal de la señal de pulsaciones.

Para complementar la prueba estadística, se representó la distribución de los datos mediante un histograma en la Figura 2. Este muestra un comportamiento típico a la curva de distribución normal de Gauss, que contiene la mayor cantidad de valores en el centro y con una disminución gradual hacia los extremos.

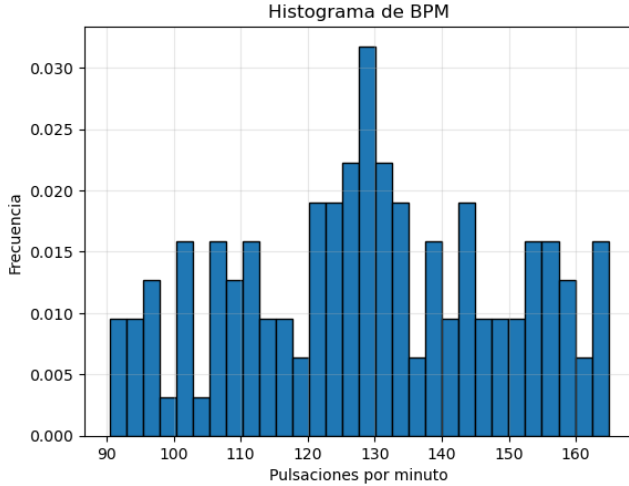


Figura 2. Histograma de los valores de pulsaciones por minuto.

También se generó un diagrama de caja en la Figura 3 para visualizar la dispersión de los datos y detectar posibles valores atípicos. Para detectar estos posibles valores atípicos, se aplicó la prueba de Grubbs con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , la cual no detectó valores atípicos en el conjunto de datos, confirmando la uniformidad de la muestra.

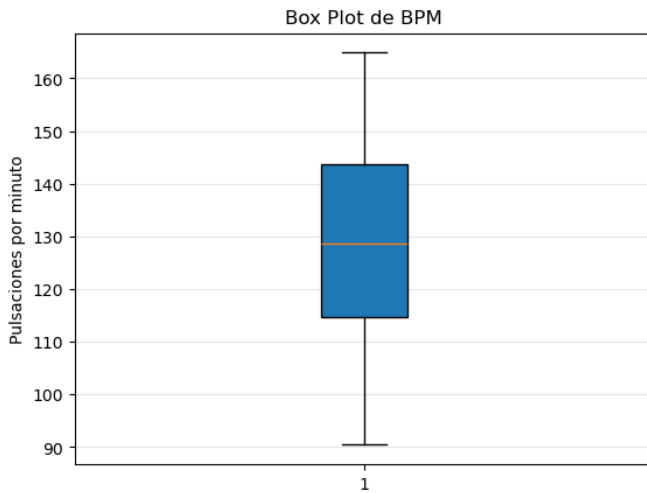


Figura 3. Diagrama de caja (Box Plot) de los datos de pulsaciones.

## II-B. Pre-Procesamiento

El preprocesamiento de la señal es una etapa fundamental en el bloque de transmisión, ya que permite eliminar el ruido,

suavizar la señal y mejorar la calidad antes de las etapas posteriores de codificación y envío por el canal. Para esta etapa se analizaron tres métodos de filtrado basados en promedios móviles: promedio móvil simple (SMA), promedio móvil acumulativo (CMA) y promedio móvil exponencial (EMA). Estos métodos se aplicaron sobre la señal de pulsaciones por minuto (BPM) obtenida en la prueba de Ecostress.

- **Promedio móvil simple (SMA):** calcula el promedio de un número fijo de muestras anteriores, otorgando igual peso a todas ellas.
- **Promedio móvil acumulativo (CMA):** calcula el promedio acumulado de todos los valores disponibles hasta el instante actual.
- **Promedio móvil exponencial (EMA):** aplica un peso exponencialmente decreciente a las muestras más antiguas, dando mayor relevancia a las más recientes. [2]

La Figura 4 muestra la comparación de las señales obtenidas con cada técnica de filtrado. Puede observarse que el filtro CMA suaviza en exceso la señal y retrasa la respuesta ante cambios, mientras que el EMA reacciona con mayor rapidez a las variaciones. El filtro SMA ofrece un buen equilibrio entre suavizado y retardo, conservando adecuadamente las características de la señal original y eliminando de forma efectiva el ruido.

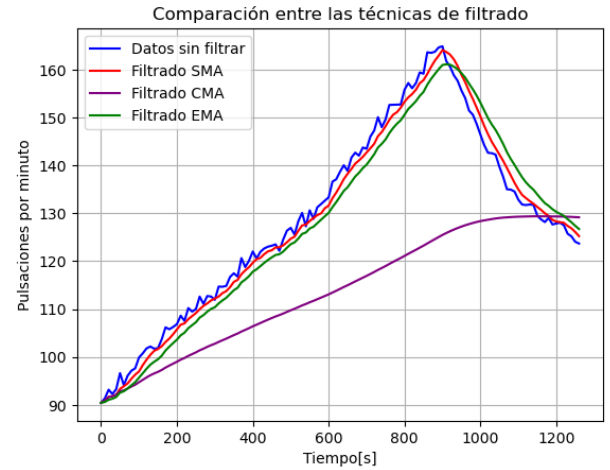


Figura 4. Comparación entre las técnicas de filtrado: SMA, CMA y EMA.

## II-C. Análisis del rendimiento computacional

Además del análisis cualitativo, se realizó una medición del tiempo promedio de ejecución de cada método de filtrado. Cada técnica fue ejecutada 200 veces y se calculó el tiempo promedio necesario para su ejecución. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla I.

Cuadro I  
TIEMPOS PROMEDIO DE EJECUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FILTRADO

Método	Tiempo promedio (s)
SMA	$7.97 \times 10^{-5}$
CMA	$5.03 \times 10^{-5}$
EMA	$5.73 \times 10^{-5}$

Como se observa, el filtro CMA es el más rápido debido a su sencillez computacional, aunque su desempeño en cuanto a ajuste de la señal es muy pobre. El filtro EMA ofrece una velocidad similar y una mejor capacidad de seguimiento, mientras que el filtro SMA, es ligeramente más lento, pero mantiene un buen equilibrio entre tiempo de procesamiento y calidad del filtrado.

Con el fin de comparar las características de cada método, se elaboró una matriz de *trade-off* que resume las ventajas y desventajas de cada técnica de filtrado en la Tabla II).

Cuadro II  
MATRIZ *trade-off* DE TÉCNICAS DE FILTRADO

Criterio	SMA	CMA	EMA
Reducción de ruido	Alto	Medio	Alto
Retardo	Medio	Alto	Bajo-Medio
Respuesta a cambios	Media	Baja	Alta
Complejidad de implementación	Baja	Baja	Baja
Costo computacional	Bajo	Muy bajo	Bajo
Bordes (inicio/fin)	Bueno	Excelente	Excelente
Portabilidad embebida (C/C++)	Muy simple	Muy simple	Simple
Riesgo de distorsión de picos	Medio	Alto	Bajo-Medio
Ajuste visual a la señal	Mejor	Pobre	Muy bueno

#### II-D. Codificación

#### II-E. Modulación

La transmisión confiable de datos en sistemas de Radio-frecuencia (RF) destinados a aplicaciones médicas exige una selección rigurosa del esquema de modulación. Estos sistemas, frecuentemente limitados por la potencia y el ancho de banda, deben garantizar la integridad de información crítica, como los latidos por minuto o los datos de la prueba Ecostress. La etapa de modulación es fundamental dentro del módulo transmisor (Tx), ya que convierte la secuencia de bits digitales generada por la fuente de datos en una señal analógica adecuada para su propagación a través del canal RF [3].

Dado que el proyecto se centra en el uso del System-on-Chip (SoC) nRF52832, base de la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE), la técnica de modulación seleccionada es la Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK). La modulación GFSK se distingue por su eficiencia espectral y su bajo consumo de potencia. Este esquema opera con una variación de la frecuencia de la portadora, de forma análoga a la modulación FSK, y esencialmente es un modulador FSK tradicional al que se le incorpora un filtro gaussiano.

En esta etapa crucial del proyecto, la información proveniente del bloque de codificación es sometida a este proceso de modulación GFSK. El desarrollo y la implementación de esta fase se llevará a cabo utilizando el software MATLAB como herramienta principal.

Para la Figura 5 se seleccionó como ejemplo uno de los códigos binarios resultantes del proceso de cuantificación, el cual representa un dato a transmitir. La interpretación de esta figura es la siguiente:

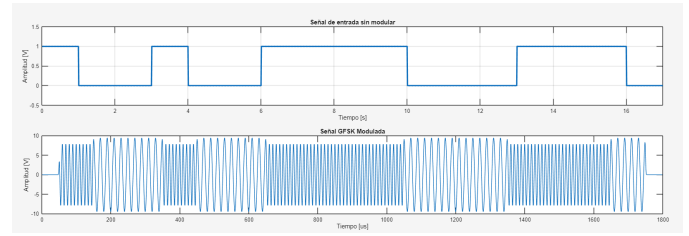


Figura 5. Modulación GFSK

Cuadro III  
MATRIZ *trade-off* DE DISTINTAS TOPOLOGÍA DE ANTENAS

Antena	Thickness (mm)	f (GHz)	$\epsilon$
"L"	0.5	2.45	4.4
Bow-shaped	0.5	2.44	4.4
Inverted-F	0.5	2.44	4.4

1. La **gráfica superior** ilustra la secuencia del código binario del dato que se desea enviar.
2. La **gráfica inferior** muestra la señal digital modulada correspondiente.

Tal como se observa en la gráfica de la señal modulada, esta no presenta la forma de una señal senoidal con un periodo constante. Esta característica es inherente a las modulaciones por desplazamiento de frecuencia (como FSK o GFSK), donde la señal varía su frecuencia de portadora. Específicamente, se obtiene un valor de frecuencia cuando se transmite un bit '1' y un valor diferente de frecuencia cuando se transmite un bit '0', lo que resulta en la forma de onda compleja y variable observada.

#### II-F. Antena

Por medio de un archivo de EAGLE, exportado al software de diseño Altium Designer por facilidad de diseño, al SoC nRF52832 se le agregó una antena basada en la tecnología microstripline utilizando la topología tipo *patch*.

La placa de circuito impreso, PCB, utiliza el componente MM8130-2600, ver Figura 6, este es un *Microwave Coaxial Connector*, el dispositivo realiza transmisiones en alta frecuencia con bajas pérdidas, junto con una impedancia nominal de 50  $\Omega$ , con una tensión nominal de 30  $V_{rms}$  y su funcionalidad se encierra en el rango de temperatura de los -40°C a 80°C [4].

Para seleccionar la antena adecuada, se analizaron las bandas de funcionamiento de la tecnología BLE. Las frecuencias aceptables se encuentran entre los [2.402, 2.480]GHz. En la tabla III se comparan las características de las antenas con topología "L", Bow-shaped y Inverted-F.

En la tabla III los valores Thickness, frecuencia y la constante dieléctrica son comparados. Al observar los valores se infiere que el único valor cambiante es la frecuencia, por lo que cualquiera de las 3 topologías seleccionadas, se pueden utilizar. En caso práctico de simulación se elige la topología tipo L.

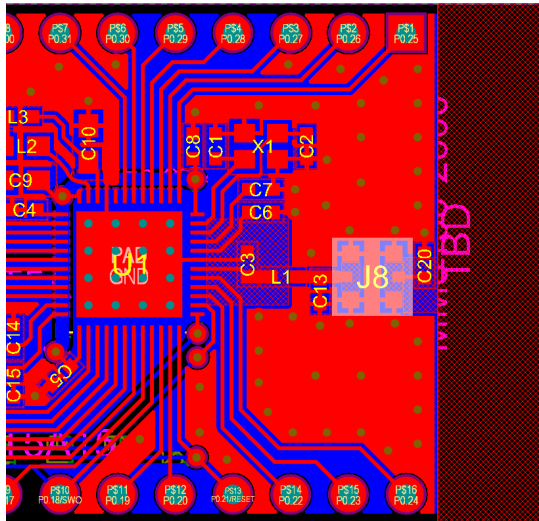


Figura 6. Componente MM8130-2600

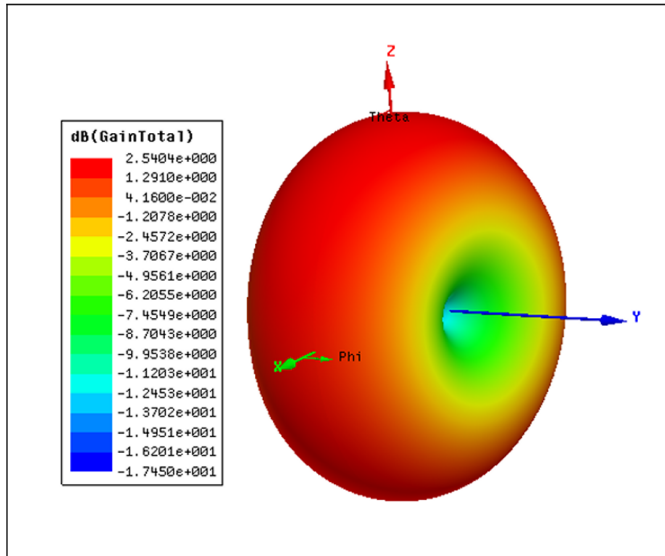


Figura 7. Patrón radiación de antena topología L

En la Figura 7 se muestra el patrón de radiación para una antena con topología L. Donde se puede analizar, junto a la distribución de ganancias en decibeles, que en el dentro de la antena habrá una ganancia promedio de -8.704dB, para una antena es una ganancia muy baja. En las zonas rojas, rodeando la antena, su ganancia puede tener valores de hasta 2.540dB, aumentando su ganancia de transmisión.

Una vez finalizado la investigación, se procede a implementarlo en el software de diseño. La antena obtenida de la Figura 8 se basó en la antena microstripline con topología tipo "L".

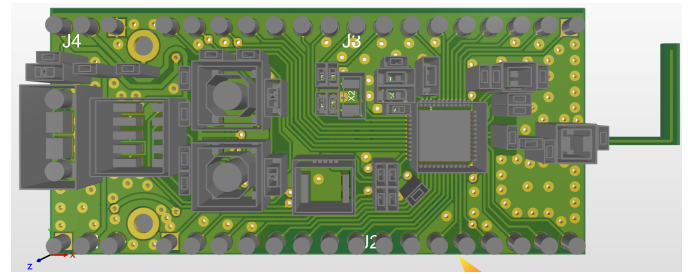


Figura 8. Render antena con topología tipo L en PCB

Además de analizar su simulación en el Parámetros S de la reflexión sobre el puerto de entrada tal como se observa en la Figura 9 [5]

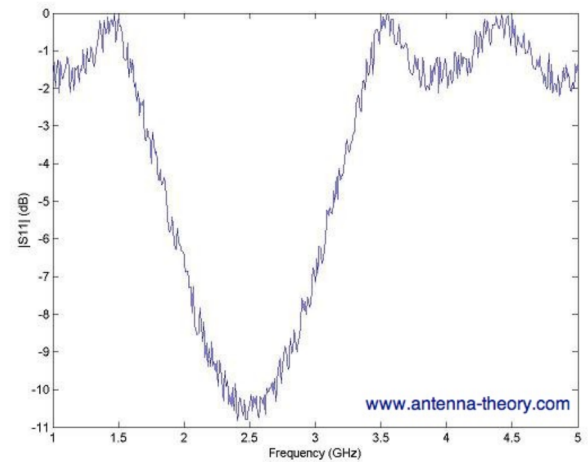


Figura 9. Parámetro S de reflexión en el comportamiento de una antena microstripline

La PCB está conformada por las siguientes características:

- El número de capas presente en el PCB es de 2, se utiliza la capa Top y Bottom, ambas capas son planos GND.
- Los tipos de vías utilizados son los Through-Hole desde la capa Top hasta la capa Bottom.
- El stackup utilizado se puede observar en la sección III que corresponde a los anexos del documento. Se contemplan 2 capas de 1oz de cobre FR4 cada una, además de las capas obligatorias de solderpaste y soldermask respectivamente.
- Las dimensiones de la placa PCB, sin su antena, son de 5cm x 2.4 cm. La antena tiene dimensiones correspondientes a 1cm de salida de la PCB y un largo de 1cm.
- Los trases se dividieron en 2 grandes grupos, los de baja anchura y alta anchura. El trase más delgado tiene un ancho de 0.2mm, contrario al más extenso de 0.6mm.

Para realizar un PCB con un stackup distinto al FR4, utilizando la composición Rogers Materials, se toman en cuenta varias consideraciones:

- Mejor funcionamiento en altas frecuencias, pero más costoso
- Menor variación de resultados en el rango de la temperatura.

III. ANEXOS

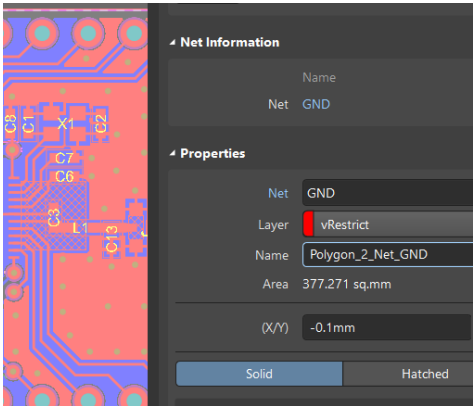


Figura 10. Capa Top de PCB con Antena tipo L

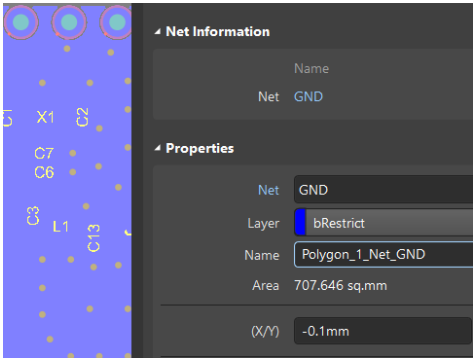


Figura 11. Capa Bottom de PCB con Antena tipo L

A screenshot of a PCB design software interface showing a table of the PCB stackup. The table has columns for #, Name, Material, Type, Weight, Thickness, Dk, and Df. The stackup consists of several layers: Top Overlay, Top Solder, Solder Resist, Solder Mask, Overlay, Dielectric 1, Dielectric 2, Bottom Solder, Bottom Overlay, and Bottom Overlay. The materials are listed as FR-4, Solder Resist, and Solder Mask. The thicknesses are 0.01016mm, 0.0305mm, 0.3204mm, and 0.0305mm. The Dk values are 3.5, 4.8, and 3.5. The Df values are empty.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.5	
1	Dielectric 1	FR-4	Dielectric	Not	0.0305mm		
2	Dielectric 2	FR-4	Dielectric	Not	0.3204mm	4.8	
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.5	
	Bottom Overlay		Overlay				

Figura 12. Stackup de PCB con Antena tipo L

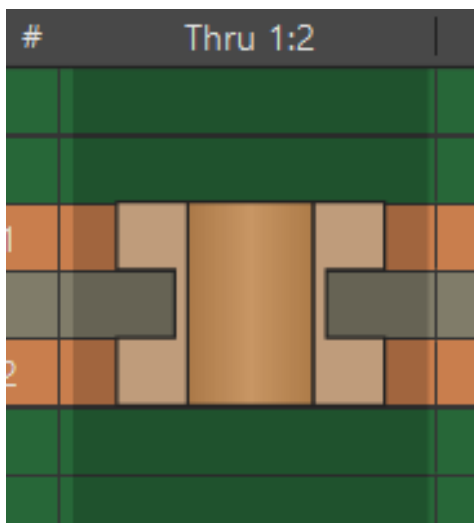


Figura 13. Vía utilizadas en PCB con Antena tipo L

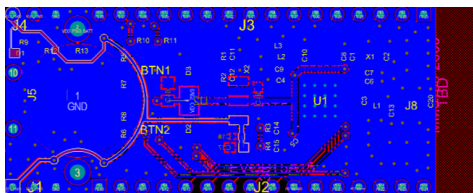


Figura 14. Puerto VDD de 5V

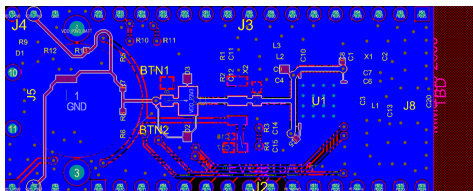


Figura 15. Puerto VDD de 3V

## REFERENCIAS

- [1] Minitab, "Interpret all statistics and graphs for normality test." [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>
- [2] A. Iglesias, "Moving averages with python." [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/moving-averages-in-python-16170e20f6c/>
- [3] S. Haykin, *Communication Systems*. Wiley Publishing, 2009.
- [4] "Microwave Coaxial Connectors." [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/281/o33e-844855.pdf>
- [5] P. Bevelacqua, "S-Parameters for Antennas (S11, S12, ...)." [Online]. Available: <https://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>