

# Proyecto Final

Mark Prendas Carranza\*, Fernando Zamora Arce\*, Douglas Barrantes Alfaro \* y Isaac Moreno Fuentes\*

\*Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 30101 Cartago, Costa Rica,  
{markpc21, lfzam.98, imoreno.04, dbarrantes45}@gmail.com

## Resumen— Palabras Clave—

### I. INTRODUCCIÓN

### II. METODOLOGÍA

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### III-A. Bloque Latidos por minuto/Prueba Ecstress

Este bloque tiene como objetivo modelar la adquisición de datos entre el monitor cardíaco y el transmisor (TX) es por ello que los datos a utilizar estarán disponible en un hoja de Excel los cuales están debidamente etiquetados para su uso.

1.

Primeramente se realizo una prueba de normalidad de los datos, para ello se desarrollo en Python una prueba de normalidad de Anderson-Darling

El análisis estadístico Anderson-Darling mide qué tan bien siguen los datos una distribución específica. Para esto la función recibe el conjunto de datos y la distribución de interés. En nuestro caso, se desea determinar si los datos de prueba siguen una distribución normal. Mientras mejor se ajuste la distribución a los datos ingresados, menor será este estadístico [1].

```
Statistic: 0.577
15.000: 0.559, data does not look normal (reject H0)
10.000: 0.637, data looks normal (fail to reject H0)
5.000: 0.764, data looks normal (fail to reject H0)
2.500: 0.891, data looks normal (fail to reject H0)
1.000: 1.060, data looks normal (fail to reject H0)
```

Figura 1. Resultados obtenidos del Test de AndersonDarling

La figura 1 nos muestra los resultados obtenidos una vez se analizaron los datos mediante la técnica Anderson-Darling. Este método nos devuelve un valor critico para cada uno de los diferentes niveles de significancia establecidos (1, 2.5, 5, 10 y 15). Para cada nivel de significancia se hace necesario determinar si el conjunto de datos siguen o no una distribución normal. Para decidir si se sigue o no dicha distribución, se debe comparar el valor critico obtenido para cada nivel de significancia con el parámetro 'Statistic' ; si el valor critico es mayor que dicho parámetro, se concluye que los datos si siguen una distribución normal. El nivel de significancia nos indica el porcentaje de probabilidad de que se concluya que los datos no siguen una distribución normal, a pesar de que estos si siguen una distribución normal. En nuestro caso se tiene que cuando se utiliza un nivel de significancia de 15 %, se nos indica que los datos no siguen una distribución normal.

Posteriormente, se genero un histograma para ver la distribución de los datos.

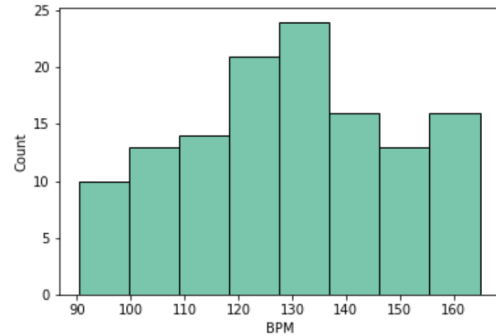


Figura 2. Histograma de los datos

Como se aprecia en la figura 2 se puede que ver que la distribución se acerca mucho a una distribución normal, exceptuado por los datos que se encuentran en los 160 BPM que distorsionan esta distribución porque en ese rango también hay muchas mediciones.

Así mismo, se analizaron los resultados mediante un método de que permite graficar los datos dentro de un conjunto de datos, para este caso como se puede observar en la Figura 3. se utilizó un Box Plot para el análisis de estos datos.

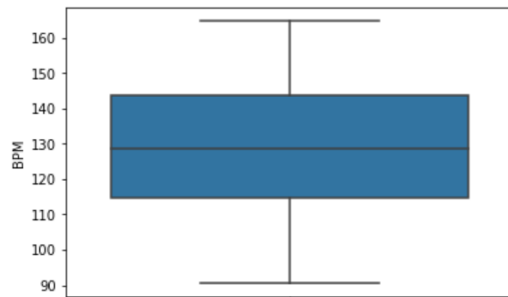


Figura 3. BoxPlot de los Datos Bajo Análisis

Como se puede observar en la Figura 3, los datos bajo análisis se encuentran en su mayoría entre los valores de 115 y 145 para los datos del BPM, así mismo, se observa que no se presentan datos extremos en nuestros datos, por otro lado, se esta trabajando con datos que van en un rango entre los 90 y 165 aproximadamente.

### III-B. Bloque Pre-Procesamiento

En esta etapa se tomaron los datos con ruido capturados por la prueba de Ecostress y a partir del análisis estadístico realizado en la sección anterior implemento un filtro que permita suprimir el ruido presente en la señal para luego pasar dicha información al bloque de Codificación.

Para filtrar el ruido presente en la señal, se implementaron una serie de filtros para comparar cual es el mas acertado para suavizar la señal y que a la vez no perder información, entre los filtros que se utilizaron destacaron: Simple Model Avarage (SMA), Cumulative Moving Average (CMA) y Exponential Moving Average (EMA), los cuales se describirán a continuación.

En cuanto al Filtro con una topología de Simple Model Avarage (SMA), funciona realizando una media no ponderada de la media móvil anterior de  $k$  puntos de datos anteriores, para el caso en particular que se muestra en la Figura 5, se muestra la señal filtrada utilizando esta topología con un  $k$  de 5 y 20. Al utilizar esta topología, se esta asegurando que las variaciones en la media estén alineadas con las variaciones de los datos en lugar de cambiar en el tiempo [2].

El EMA es una técnica extensamente utilizada para filtrar el sonido y detectar tendencias. El peso de cada componente reduce progresivamente con el tiempo, lo cual supone que la media móvil exponencial proporciona un mayor peso a los datos actuales. Esto se hace bajo la iniciativa de que los datos actuales son más importantes que los datos viejos. Comparativamente con la media móvil sencilla, la media móvil exponencial reacciona más veloz a los cambios, debido a que es más sensible a los movimientos actuales.

Por otro lado está el filtrado por media móvil acumulativa, CMA por sus siglas en inglés que toma la media no ponderada de valores anteriores hasta el actual momento  $t$ . El SMA tiene una ventana deslizante de tamaño constante  $M$ . Por el contrario, el tamaño de la ventana aumenta a medida que pasa el tiempo al calcular el CMA [2].

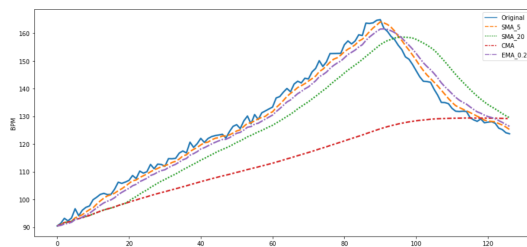


Figura 4. Comparación de señal original y filtrada

Como apreciamos en la Figura 5 el filtro aplicado que obtuvo la mejor aproximación sin perder tanta información fue el SMA utilizando la media móvil de los 5 datos anteriores, ya que si observamos el filtro del SMA con la media móvil de los 20 datos anteriores, la salida del filtro cambia mucho con respecto a la señal original, lo mismo sucede cuando aplicamos el filtro EMA con un factor de suavizado igual a 0.2. Por otro lado, el filtro que tuvo peor rendimiento fue el CMA, ya que

a la salida de este filtro, perdemos demasiada información en relación a la señal original.

Un DSP está diseñado teniendo presente las labores más comunes del procesamiento digital: sumas, multiplicaciones y retrasos (almacenar en memoria).

Los DSP abandonan la arquitectura tradicional de Von Neumann, en la que datos y programas permanecen en la misma región de memoria, y apuestan por la llamada Arquitectura Harvard. En una arquitectura Harvard hay bloques de memoria físicamente separados para datos y programas. Todos dichos bloques de memoria se direcciona por medio de buses separados (tanto de direcciones como de datos), e inclusive es viable que la memoria de datos tenga distinta anchura de palabra que la memoria de programa (como pasa en determinados microcontroladores).

La ventaja principal de la arquitectura Harvard es el acceso simultáneo a más de una memoria del sistema.

### III-C. Bloque Codificación

En esta etapa se tomo la información filtrada proveniente del bloque de Pre-procesamiento, para posteriormente aplicar un método de codificación de tipo Hamming.

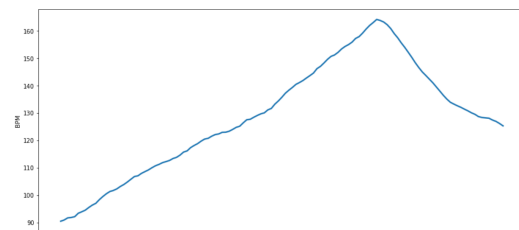


Figura 5. Señal filtrada

Previamente a la codificación Hamming se debía tomar la señal filtrada, recordando que la escogida era la proveniente del filtro SMA utilizando la media móvil de los 5 datos anteriores (SMA\_5) y discretizarla, para esto se implemento una función en Python de convertidor analógico-digital que muestrea la señal analógica, en donde se uso un tiempo de muestreo de 10 segundos; luego la señal muestreada se pasa por un cuantificador uniforme, en donde se escogió un nivel de cuantificación igual a 100, el nivel de cuantificación es el parámetro que determina la precisión con que se cuantifica, cuanto mayor sea, mayor precisión. Este nivel se escogió debido a que se necesitaba un nivel alto para no perder tanta información de la señal original.

Después de cuantificar la señal, se procedió a codificar la señal mediante el uso de una etapa de conversión de decimal a binario para poder representar los 74 niveles mediante 11 bits, de esta manera, es posible representar a todos niveles de la señal discreta en binario. Estos 74 niveles, se encontraban entre 90 BPM como el nivel mas bajo y 164 BPM como el nivel mas alto en la muestra de datos bajo estudio.

Y por ultimo con la señal ya cuantificada y codificada se proceso por medio de una codificación tipo Hamming. Esta codificación Hamming, es una etapa que funciona como

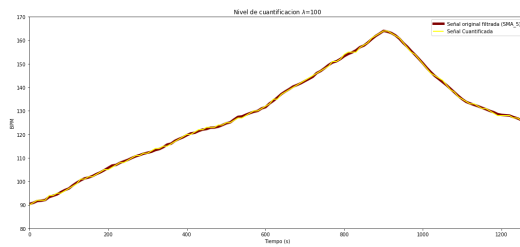


Figura 6. Señal filtrada vs Señal cuantificada

un detector y corrector de ciertos errores que puedan estar afectando los datos con los que se está trabajando, es decir, en esta etapa se utilizará para insertar información de corrección de errores en los flujos de datos.

A continuación se muestra en el Cuadro I, se muestra el flujo de procesamiento que se ha utilizado para poder procesar las mediciones bajo estudio.

Cuadro I  
FLUJO DE PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES

Tiempo(s)	Señal Original	Datos filtrados (SMA, 5)	Datos cuantificados	Datos codificados	Datos codificados por Hamming
0	0	90.435881	90.435881	90	000000000000
1	10	91.375558	90.905720	91	000000000011
2	20	93.177147	91.862862	92	000000000010
3	30	92.253070	91.810414	92	000000000100
4	40	93.297168	92.107765	92	000000000100
...	...	...	...	...	...
122	1220	127.489200	128.012833	128	000001001100
123	1230	125.722564	127.351940	127	000001001011
124	1240	125.176371	126.855292	127	000001001011
125	1250	124.053356	126.094034	126	00000101010000
126	1260	123.681245	125.224547	125	00000100011100

A la hora de codificar mediante Hamming, se tienen a disposición dos enfoques predominantes, los cuales son el Hamming (7,4) en el cual se transmiten siete bits en total, de los cuales cuatro son bits de datos, y los tres restantes corresponden a bits de paridad; la otra alternativa disponible era el Hamming (15,11) en el cual se transmiten quince bits totales, de los cuales once son bits que contienen la información deseada, y los cuatro restantes corresponden a bits de paridad. Ahora, tomando en cuenta que para los 74 niveles se requieren de al menos siete bits para que sean representados, dejando así la posibilidad de llegar con la misma cantidad de bits hasta 128 niveles. Con base en lo anterior, se descarta el Hamming(7,4) como opción, y por ende se concluye que el enfoque que mejor se adecuaba a estas condiciones corresponde al Hamming(15,11), con la desventaja que se transmiten cuatro bits de datos de manera innecesaria.

### III-D. Bloque Modulación

En esta etapa se toma como base la información proveniente del bloque de Codificación. Dichos datos pasan por un proceso de modulación que emplea la tecnología BLE, utilizando el software de Matlab como herramienta para desarrollar esta fase del proyecto. La tecnología mencionada anteriormente utiliza un esquema de modulación GFSK, que corresponde a un modulador FSK tradicional con un filtro gaussiano incluido.

En general, modulación FSK asigna diferentes frecuencias a la portadora dependiendo del bit que se este transmitiendo. En caso de que se transmita un 0, la portadora asume una determinada frecuencia de la portadora para este bit. Por otro lado, cuando se transmite un 1, la frecuencia de la portadora cambia a un valor correspondiente a dicho bit y permanece en esta frecuencia durante la duración del bit.

Ahora en lo que respecta a la modulación GFSK, se tiene que los datos se codifican variando las frecuencia de la portadora de manera similar a la modulación FSK descrita anteriormente. Por lo tanto, el modulador utilizado puede ser el mismo que se utiliza para la modulación FSK. Asimismo, los datos pasan a través de un filtro gaussiano antes de entrar en el modulador de pulsos para disminuir el ancho espectral de los mismos. El filtro gaussiano se utiliza para suavizar la transición entre los valores de los pulsos.

El resultado obtenido después de modular la trama de bits proveniente de la codificación de hamming y pasarla por el filtro gaussiano la podemos apreciar en la siguiente figura:

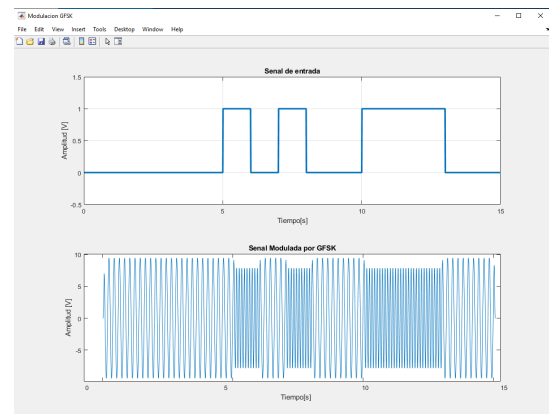


Figura 7. Modulación GFSK

Para la gráfica anterior se tomo como ejemplo uno de los códigos que representa a uno de los datos que se desean enviar, obtenido como resultado del proceso de cuantificación para dicho dato. Interpretando la figura 7, se tiene que la gráfica superior corresponde al código binario del dato que se desea enviar, mientras que la gráfica inferior corresponde a la señal digital original ya modulada. Tal como se observa en dicha gráfica, la señal modulada no corresponde a una señal senoidal con un periodo definido. Lo anterior se debe a las variaciones que se presentan en cuanto a la frecuencia de la portadora, obteniendo un valor para cuando se transmite un 1 y otro diferente cuando se transmite un 0.

### III-E. Bloque Antena

En esta etapa se tiene como función enviar el mensaje de información modulado hacia el receptor mediante un canal de comunicación, debido a ello el sistema de antena en el SoC nRF52832 esta basado en tecnología microstripline utilizando un topología tipo patch, es por ello que se debe sugerir una topología de antena y completar el board en el software Eagle según las especificaciones técnicas de la banda de transmisión de la tecnología BLE.

Como se mencionó anteriormente, para esta etapa, se va a utilizar un PCB en donde se va a ejecutar por medio del programa Eagle, a dicho dispositivo se va le analizaron diferentes parámetros y componentes, entre ellos, se analizaron componentes como lo son la cantidad de capas y vías que posee dicho PCB, así como las dimensiones de los pads que presenta el PCB. En primera instancia, se observó que el PCB presenta una configuración multi capa con una cantidad de dos capas, una capa superior y una capa inferior. Así mismo, se observó que presenta una cantidad de 121 vías y 241 pads, las cuales poseen un diámetro que va desde los 0.9 mm, 1.75 mm y los 3 mm.

En el PCB se utiliza un conector coaxial de microondas MM8130-2600, en su hoja de datos describe que es muy útil para la medición de características eléctricas de circuito microondas para pc, tablet, celular y equipo inalámbrico; a la hora de utilizar este conector hay que tomar en cuenta que sus entradas y salidas son de 50 Ohm.

En lo que respecta a la tecnología BLE, los dispositivos que implementan dicha tecnología operan en la banda ISM de 2.4 GHz. Ahora, con base en el archivo adjunto en el enunciado del proyecto para esta etapa, se seleccionaron 2 topologías para la implementación de la antena que se utilizara para la transmisión de los datos, las cuales son bow-shaped e inverted-F. [3]

En primera instancia se tiene la topología bow-shaped, la cual es una antena monopolo ampliamente utilizada. La frecuencia de resonancia de dicha antena se relaciona con el ancho de línea "w", el espacio entre líneas "D", la longitud de línea "L" y la constante dieléctrica del sustrato. Cabe mencionar que para mejorar la eficiencia de radiación, se recomienda ampliar el área sin el cobre que sirve como tierra de referencia.

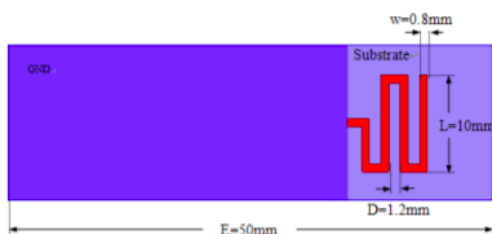


Figura 8. Estructura antena tipo bow-shaped

En la imagen de la figura 8 se muestra la estructura general

de una antena implementada mediante la topología bow-shaped.

En segunda instancia se tiene la topología inverted-F, la cual corresponde es una topología de antena utilizada en las aplicaciones inalámbricas, principalmente en UHF y microondas. Dentro de la lista de aplicaciones, se encuentran las aplicaciones BLE, como dongles USB, dispositivos de proximidad, monitores de frecuencia cardíaca (HRM), dispositivo de interfaz humana (HID), entre otros. Por otro lado, cabe mencionar que el rendimiento de este tipo de antena puede verse afectado por ciertos factores tales como el tamaño de la placa PCB, la constante dieléctrica del sustrato, el tamaño de la antena y la posición de la antena en la placa PCB.

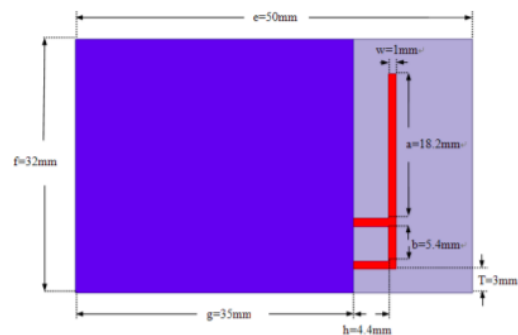


Figura 9. Estructura antena tipo inverted-F

En la imagen de la figura 9 se muestra la estructura general de una antena implementada mediante la topología inverted-F.

Así mismo, dado que la antena que se quiere implementar debe de estar interconectada en un lugar determinado, es que se propone la antena que se observa en la Figura 10, en donde se muestra la posición en específico en donde se colocó, así como la vista en donde se observa de que pin se está conectando dicha antena.

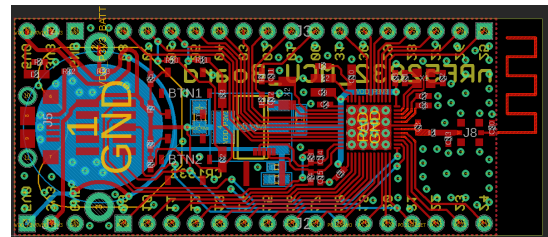


Figura 10. Antena interconectada al PCB dentro del software Eagle

Como se puede observar en la Figura 10, se utilizó una antena con una topología de bow-shaped, dado que este tipo de topologías presenta .... Esta antena implementada funciona para las bandas de frecuencias de 2.4GHz

Como se puede observar en las Figuras 11 y 12, se muestra los patrones de radiación de la antena propuesta, estos patrones de radiación se podrían llegar a obtener mediante recursos o herramientas de software como puede ser la herramienta MMANA GAL, la cual, es es una herramienta de análisis de

antenas basada en el método del campo electromagnético de las antenas.

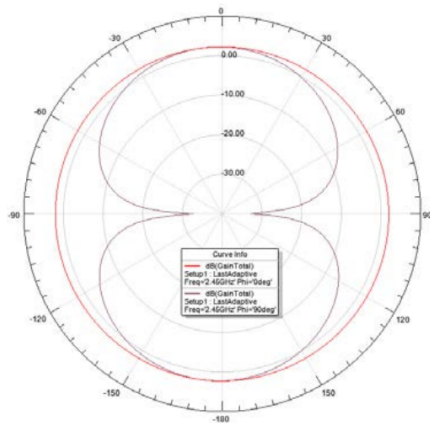


Figura 11. Característica de ganancia en el plano electro magnético de la antena

Como se puede observar en la figura anterior, se muestra la curva de la característica de ganancia en el plano EH de la antena en forma de arco.

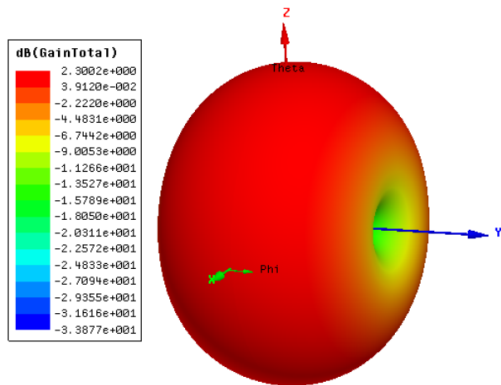


Figura 12. Patrón de radiación 3D de antena en forma de arco

Como se puede observar en la Figura 12, se muestra el patrón de radiación en tres dimensiones de la antena escogida con una topología Bow shaped.

Por otro lado, en la Figura 13, se muestra la curva del parámetro de reflexión  $S(1,1)$  de la antena Bow shaped.

Ahora, con base en lo expuesto hasta este punto, ya es posible escoger entre alguna de las topologías propuestas. Para ello se tomaron como referencia en cuenta aspectos tales como parámetros de transmisión y reflexión, patrones de radiación, y rango de frecuencia a la cual se desea operar. Como se menciono inicialmente la tecnología BLE trabaja en la banda ISM a 2.4 GHz, con lo cual dicha valor corresponde a la frecuencia de interés. Observando la figura 12, se observa el parámetro de reflexión para la topología bow-shaped donde se alcanza un mínimo a 2.4 GHz, lo cual es un aspecto positivo

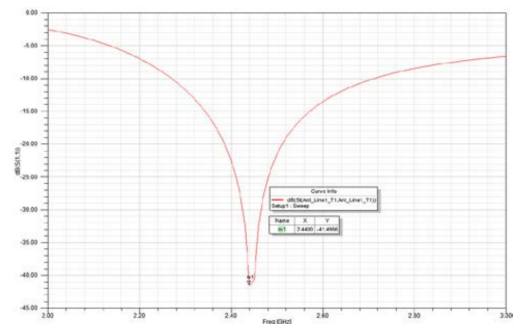


Figura 13. Curva del parámetro  $S(1,1)$  de una antena Bow shaped

ya que significa que para nuestra frecuencia de interés la transmisión de datos es óptima.

Así mismo, el objetivo de que la antena posea un plano a tierra debajo de la capa TOP en el PCB tiene como objetivo optimizar la recepción de datos en la frecuencia de interés, como se observa en la Figura 13, el parámetro de reflexión  $S(1,1)$  se ve que presenta un mínimo de reflexión en aproximadamente los 2.4 GHz de frecuencia, dado que como se comentó anteriormente, esta antena es para operar en la banda ISM la cual opera a 2.4 GHz, esto permite que en justamente en la frecuencia de operación de interés se de una máxima transferencia de información, optimizando la transmisión de datos ya que la reflexión en el canal de transmisión para este rango de frecuencias es mínimo.

Luego, se procedió a investigar que implicaciones habrían en el patrón de radiación si la antena tuviera sustrato flexible, para ello se analizo un patrón de radiación de una antena hecha del sustrato flexible Kapton 14.

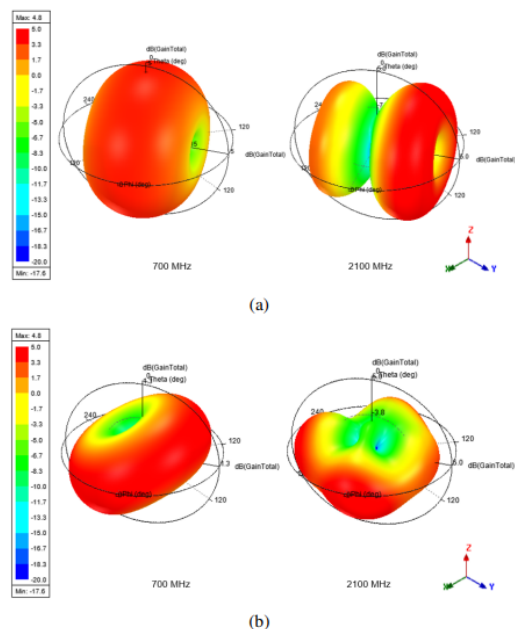


Figura 14. Patrón de radiación de la antena con un sustrato flexible en a) una superficie plana y en b) una superficie esférica [4]



Como podemos apreciar en la figura 14 a) hace referencia al patrón de radiación de la antena en una superficie plana, la cual se asemeja mucho al comportamiento de nuestra antena propuesta observando el patrón de radiación de la figura 10, Ahora bien si analizamos el patrón de radiación de la antena con sustrato flexible en una superficie curva la cual corresponde a la Figura 14 b) este tiene una forma más omnidireccional, lo cual garantizaría una buena capacidad de detección y recepción de señales radiadas desde cualquier dirección.

Se consideran dos alternativas para los stack-ups del PCB, la primera siendo FR-4, y la segunda Rogers Materials, por lo tanto se realizó una comparativa de cuatro aspectos importantes entre dichas tecnologías: Precio, comportamiento en alta frecuencia, estabilidad de impedancia y manejo de temperatura. De manera general FR-4 es la opción más barata, perfecta para prototipos o aplicaciones que no requieran alta fidelidad, ya que Rogers Materials posee un mejor comportamiento en alta frecuencia, ya que poseen un 20 % menos de constante dieléctrica, lo que aumenta el ancho de banda y la frecuencia de resonancia, la impedancia de los Rogers varía menos que los FR-4, y además trabajan de mejor manera en altas temperaturas.

#### IV. CONCLUSIONES

##### REFERENCIAS

- [1] L. S. Nelson, "The anderson-darling test for normality," *Journal of Quality Technology*, vol. 30, no. 3, p. 298, 1998.
- [2] F. Johnston, J. Boyland, M. Meadows, and E. Shale, "Some properties of a simple moving average when applied to forecasting a time series," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 50, no. 12, pp. 1267–1271, 1999.
- [3] T. Pattnayak, G. Thanikachalam, and A. P. Family, "Antenna design and rf layout guidelines," *Cypress Semiconductor AN91445; Cypress Semiconductor: San Jose, CA, USA*, p. 17, 2015.
- [4] R. Coto-Salazar and R. Rimolo-Donadio, "Design of a 4g/lte multiband antenna considering curvature effects," in *2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018)*, 2018, pp. 1–3.