

Diseño e Implementación de un sistema de comunicaciones acopladas por el cuerpo para la transmisión de música

Giancarlo Murillo, Alex Cartagena

giancarlo.murillo@ucsp.edu.pe, acartagena@ucsp.edu.pe

Universidad Católica San Pablo, Perú
Campaña Paisajista s/n
Arequipa - Perú

Resumen: Gracias a la revolución de las telecomunicaciones y la electrónica, hay una proliferación de dispositivos en el ámbito médico y otros más que operan en el área corporal. Existe una forma novedosa de conectar dos transceptores con el cuerpo humano como canal de comunicación mediante acoplamiento capacitivo corporal, BCC (Body Coupled Communication) es una tecnología que usa el cuerpo humano como medio de propagación del campo eléctrico sin necesidad de usar cables u otra tecnología de RF. El objetivo de este trabajo es el diseño e implementación de un sistema BCC para transmitir audio usando el hardware USRP1 y el software GNURadio para dicho diseño, para este trabajo se realizó medidas del canal de cuerpo humano mediante un generador de señales y osciloscopio, se usó también un VNA portátil para medir la impedancia y verificar las medidas. Se usó una tasa de bits de 128 Kbps para transmitir.

Palabras clave: Acoplamiento Capacitivo, Body Coupled Communication (BCC), Software Defined Radio (SDR), Procesamiento de Señales Aplicado a las Comunicaciones, Radiofrecuencia, Filtros y Antenas.

Abstract: Thanks to the revolution in electronics and telecommunications, there is a proliferation of devices for medical application and others operating in the body area. There is a novel way to connect two transceivers with the human body as a communication channel by body capacitive coupling. BCC (Body Coupled Communication) is a technology that uses the human body as an electric field propagation medium without using wires or another RF technology. This work aims to design and implement a BCC audio transmission system by using the USRP1 hardware and GNU radio for the design, for this work we use measure the body channel frequency response by using a signal generator and an oscilloscope, we used a portable VNA to measure the impedance and verify the data. We used a bit rate of 128 Kbps to transmit.

Keywords: Capacitive coupling, Body Couple Communication (BCC), Software Defined Radio (SDR), Applied Signal Processing for Communications, Radiofrequency, filters and antennas..

1 Introducción

La revolución de las comunicaciones ha sido uno de los más grandes eventos contemporáneos. Gracias a los avances en la microelectrónica y las comunicaciones inalámbricas [CAVALLARI2014], se logró el incremento en el interés [PEREIRA2015] y la proliferación de dispositivos personales y tecnologías de comunicación [ATTARD2012]. Con el nuevo mercado emergente de dispositivos para ámbitos médicos (monitoreo de señales vitales), ámbitos deportivos o entretenimiento, existe una necesidad alternativa de conectar inalámbricamente dichos dispositivos [PEREIRA2015]. Las aplicaciones para estos tipos de dispositivos tienen requerimientos técnicos y variables no solo con el desempeño, el retraso, la flexibilidad o la eficiencia energética [CAVALLARI2014], sino que deben enfocarse en ser eficientes y seguros [SCHENK2008].

Debido a la necesidad de comunicarse en un área corporal, es decir, que se comunique únicamente alrededor del cuerpo humano [BAE2012], se requieren nuevos métodos alternativos a la comunicación basados en RF (Radio Frequency).

BCC (Body Coupled Communication) es una tecnología novedosa la cual usa el cuerpo humano como medio de propagación, mediante la transmisión de una señal formando un campo eléctrico a través del cuerpo

[ATTARD2012]. Esto no solo garantiza que el cuerpo humano este enteramente comunicado, sino que a la vez los rangos de comunicaciones estén alrededor de este mismo. La presencia del cuerpo humano afecta las ondas de radio propagación, por lo cual tiende a ser peculiar y debe ser bien entendido [PEREIRA2015] BCC ofrece ventajas en comparación [ATTARD2012]. Para diseñar un sistema de comunicaciones BCC, varios parámetros deben ser tomados en cuenta para el diseño de nuevos protocolos como el consumo de energía y la privacidad [CAVALLARI2014]. Se sabe que esta tecnología es de muy baja potencia gracias a que no necesita usar conversores de altas frecuencias [SAZONOV2014], mientras que a la vez trabaja en la banda de HF (High Frequency) sin requerir el uso de antenas. BCC es una solución atractiva para comunicaciones cercanas de rango corto en el cuerpo humano [LINNARTZ2013], y le hace una de las tecnologías más eficientes en comparación con las de RF [ATTARD2012], [ZHAO2014], [SAZONOV2014], [KAZIM2015].

BCC al ser una tecnología que se centra y se basa en el cuerpo humano, la convierte en la mejor opción para implementar un sistema de audio. Como se ve en la Tabla 3, de todas las opciones inalámbricas, es especial debido a un menor consumo de energía, simplicidad, a la vez su rango [SAZONOV2014].

BCC se clasifica en dos tipos por tecnologías de comunicación: BCC Galvánico, el cual mediante 2 pares de electrodos colocados en el cuerpo, permiten la transmisión de información usando el cuerpo humano como si fuese una línea de transmisión y BCC Capacitivo, el cual mediante dos electrodos no necesariamente tocando al cuerpo, se comunican mediante el campo eléctrico inducido en el cuerpo [KAZIM2015], [SAZONOV2014], [ZEDONG2012] por medio del acoplamiento capacitivo como se muestra en la Figura 12, tanto en el transmisor como en el receptor el acoplador está compuesto por 2 placas en paralelo, conocida como el electrodo de señal SE (Signal Electrode) y el electrodo de tierra GE (Ground Electrode) [ATTARD2012].

Tabla 4: Comparación de BCC con tecnologías comerciales

Nombre comercial	BCC	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Estándar	802.15.6	802.15.4	802.15.1	802.11n
Banda de frecuencia de trabajo	5-50 MHz	900 MHz	2.4 GHz	2.4 / 5 GHz
Tasa de bits	2 Mbps	250 Kbps	1 Mbps	150 Mbps
Potencia	Muy baja	Baja	Moderada	Alta
Rango	Menor a 3 metros	100 metros	10 metros	100 metros
Complejidad	Muy simple	Simple	Complejo	Muy complejo
Facilidad de uso	Fácil	Fácil	Normal	Difícil
Tiempo de configuración	Menor de 100 ms	30 ms	Algunos segundos	Algunos segundos
Modulación	Transmisión digital selectiva de frecuencia	Espectro ensanchado por secuencia directa	Espectro ensanchado por salto de frecuencia adaptativo	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
Enfoque aplicado	Redes de área corporal	Redes de sensores, control industrial	Reemplazo de cables	Redes de área local

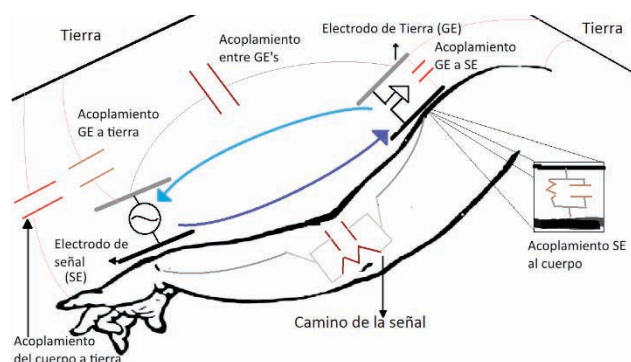


Figura 1: Componentes de BCC

Ciertos dispositivos como los audífonos, permiten escuchar música en cualquier momento debido a que son portables, la forma en que se conectan a los dispositivos móviles como los reproductores de música es directamente mediante un cable, donde la información pasa analógicamente. Sin embargo, estos al estar siempre en el cuerpo no solo tienden a enredarse, sino a romperse.

Las opciones inalámbricas RF actuales como Bluetooth son comerciales, sin embargo, al funcionar en altas frecuencias, irradian a mayores distancias del cuerpo dado a que usan antenas y esto lleva a que exista interferencia con dispositivos que operan en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical). BCC a diferencia de

las tecnologías de RF no utiliza tanta energía ya que trabaja en bandas menores de frecuencias [SAZONOV2014] y se limita al cuerpo ya que no irradia mediante antenas, lo cual lo hace más seguro.

El siguiente trabajo se enfoca en el uso de la tecnología BCC capacitiva, ya que al no estar necesariamente en contacto [SCHENK2008] es preferido y considerado para diseñar y construir dos nodos de comunicación corporal, cuya transmisión esta acoplada por BCC y emplea el tipo de acoplamiento capacitivo para la transmisión de información multimedia en la USRP1 (Universal Software Radio Program).

El siguiente paper está organizado de la siguiente forma: En la sección 2 se muestran los trabajos previos relacionados con BCC, en la sección 3 describimos la metodología del trabajo, en la sección 4 se presenta el diseño, el estudio el canal mediante un sistema simple mediante un generador de señales y osciloscopio, se corrobora mediante un VNA portátil y se hacen los cálculos para usar en la USRP1, en la sección 5 se presentan los resultados, finalmente en la sección 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2 Trabajos previos

Hay muchos estudios con respecto al canal corporal:

Según [ZEDONG2012], reporta que el acoplamiento es mucho mejor a bajas frecuencias, por lo que en un plano de tierra más grande podría fortalecer el acoplamiento de la señal. A la vez se sabe que las señales fisiológicas del cuerpo, así como la temperatura, la humedad y la postura de este, no tienen efecto alguno en la comunicación sobre todo a frecuencias menores a 6 MHz. También se debe tener en cuenta de que, al alimentar los instrumentos de medidas con la potencia de la red principal, crea un camino de retorno a través de la tierra de la fuente de potencia, es por ello que, para caracterizar el canal, es recomendable usar baterías como fuente de poder.

A pesar de que [ATTARD2012] menciona que las frecuencias con las mejores características favorables son entre 280 MHz y 500 MHz, también menciona que a medida que se aumenta la frecuencia, la señal decrece cuando el receptor está colocado más lejos del cuerpo, también menciona que, para una persona de 80 Kg, esta estará segura si se expone a una radiación de hasta 6.4 W, es decir 0.08 W/Kg.

En [PEREIRA2015] presenta un modelo extendido el cual intenta explicar el canal enteramente.

En [HAYASHIDA2016] se analiza el ruido radiado a través del cuerpo humano que se introduce para este tipo de comunicaciones, se concluye que hay problemas de ruido desde fuentes de luz eléctrica el cual acopla al cuerpo deteriorando el canal aproximadamente en 5.11 dB, sin embargo, este problema se arregla al colocar un segundo electrodo de tierra.

3 Metodología

Para investigar las características de canal y la banda de frecuencia, se usa los datos del estado del arte de trabajos previos para saber el comportamiento del cuerpo humano

como canal, y se hacen las respectivas medidas para corroborar los datos analizando el espectro del canal.

En la construcción de los acopladores para saber que dimensiones son las más óptimas se usa la información recopilada para determinar las características físicas del transceptor.

Para determinar el rango de frecuencias en el cual la respuesta del canal sea lo más plana posible y que provea la menor atenuación, dichas medidas se realizan mediante un generador de señales, el cual hace un barrido desde la banda de 1 MHz a 25 MHz, con una potencia de 13 dBm y 5 barridos en frecuencia que constan de 20 segundos. La separación entre los acopladores es de 70 cm de muñeca a muñeca, las lecturas son recibidas mediante un osciloscopio, este esquema de medición se ve en la Figura 2.

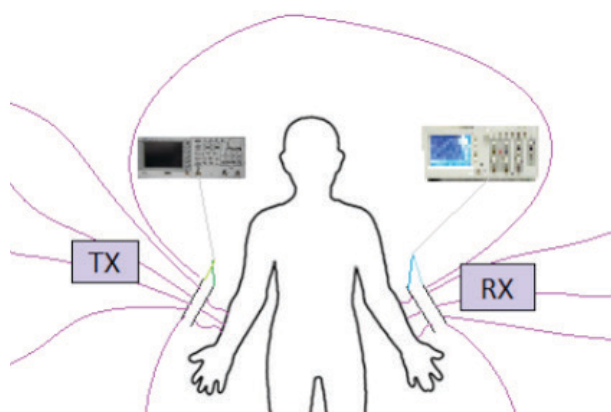


Figura 2: Diagrama de medición del canal

Se usa FSK en la modulación por su sencillez y robustez, la comunicación se implementa el respectivo transmisor y receptor en la USRP1 donde se conectan los electrodos y la programación se hace en el software GNURadio.

3.1. Modelo del canal

Dado que el canal de transmisión de BCC está compuesto por el acoplamiento capacitivo entre los nodos, el modelo de canal es expresado por elementos del ambiente capacitivo [HAYASHIDA2016], esto se puede ver con más detalle en la Figura 1, la comunicación se compone de una parte intrínseca en la cual la comunicación desde el acoplador de transmisión al de recepción solo depende de la distancia entre SE's, mientras que la componente externa depende de factores externos como el acoplamiento entre GE's y el plano de tierra externo, también existen elementos indeseados como el acoplamiento entre GE's o Acoplamiento entre el cuerpo y los planos de tierra.

4 Diseño

4.1. Banda del canal del cuerpo humano

En la Figura 3 se muestra la potencia recibida en función a la frecuencia. Se observa que el canal corporal es un mejor medio de propagación en la primera decena de MHz, teniendo la mejor respuesta en la banda centrada a 6 MHz ya que es más plana, se verifica que a dicha frecuencia se tiene una ganancia máxima de hasta 27 dB.

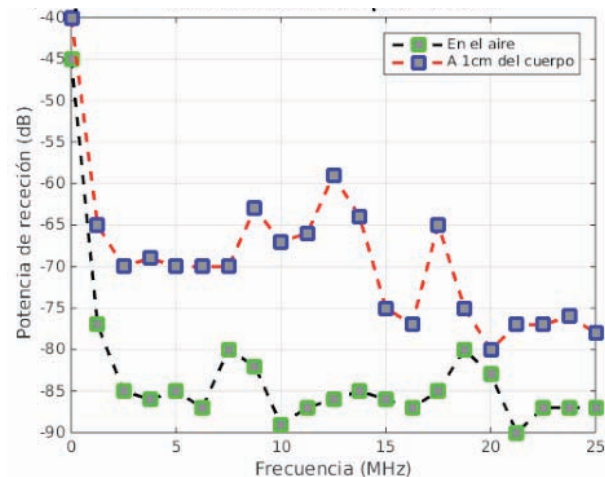


Figura 3: Potencia recibida empleando BCC

También se midió la respuesta en un VNA (Vector Network Analyzer), el cual servirá para corroborar la respuesta en frecuencia del cuerpo humano con diferentes separaciones entre los electrodos del acoplador, el esquema se visualiza en la Figura 4, los resultados se muestran en la Figura 5, se visualiza que el canal tiende a ser plana a partir de la frecuencia de 1 MHz con una magnitud de 14 dB.

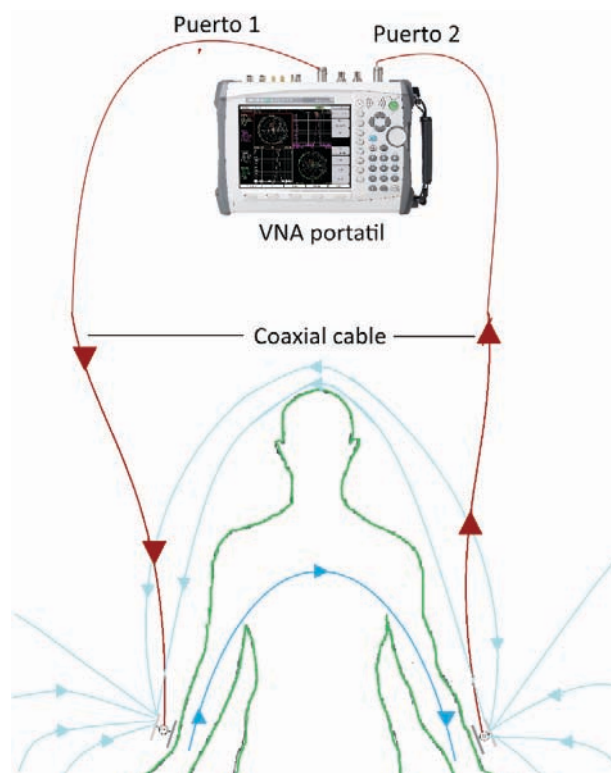


Figura 4: Esquema de medición del canal mediante el VNA

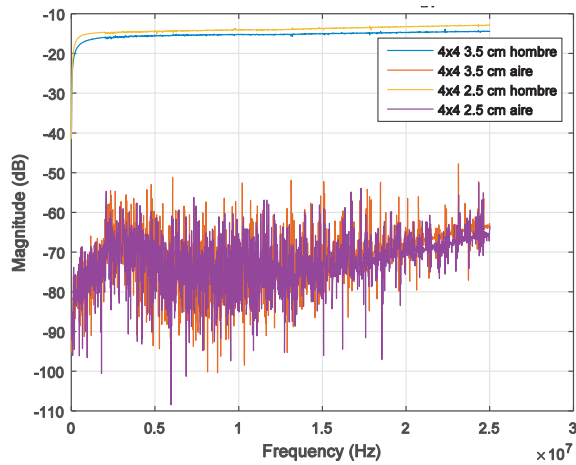


Figura 5: Respuesta del parámetro S21 del cuerpo con diferentes separaciones

La impedancia de los acopladores se puede ver en la Figura 6, donde la impedancia de los acopladores en el cuerpo, tiende a estar mejor adaptado que en el aire.

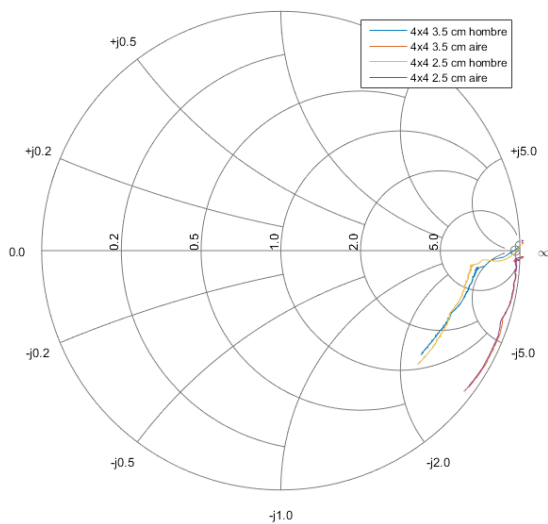


Figura 6: Carta de Smith del parámetro S11

4.2. Sistema de comunicaciones BCC

En la Figura 7 se puede visualizar un sistema de comunicaciones, el sistema consiste de dos computadoras separadas, las cuales se encargan de hacer el procesamiento, una transmite la información y la otra la recibe mediante cable USB y cable coaxial, conectado directamente a la USRP1 para el procesamiento.

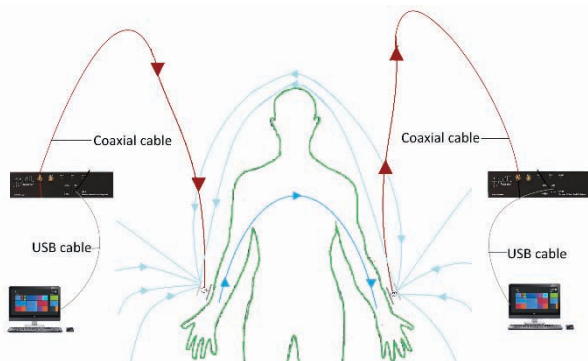


Figura 7: Esquema de sistema de comunicación

4.3. Diseño en GNURadio para la USRP1

En GNURadio, la fuente de información de audio es importada desde un archivo WAV con las siguientes características [PINAR2011]:

- Bits por muestra: 16 bits.
- Frecuencia de muestreo: 32 KHz.
- Rango: -1 a 1.

El modulador FSK que se diseña cuenta con la característica la cual el parámetro bits por símbolo es 1:

Inicialmente, La ecuación (1) sirve para calcular la tasa de bits necesaria, la ecuación (2) es para cargar la tasa de bit y la tasa de símbolo necesaria para implementar nuestro sistema de comunicación, pero el resultado de la ecuación (3), la cual sirve para calcular el número de muestras por símbolo no puede usarse debido a que debe ser un número entero positivo mayor o igual a 2 muestras por símbolo, por lo que enviar la señal no será posible, sin mencionar que este valor al ser muy pequeño, sería difícil de reconocer.

$$1024 (Kbps) = 32(KHz) * 32 \left(\frac{Bits}{Muestra} \right) \quad (1)$$

$$1024 \left(\frac{KSimbolos}{segundo} \right) = \frac{1024(Kbps)}{1(bpS)} \quad (2)$$

$$1.9531 \left(\frac{Muestras}{Simbolo} \right) \cong \frac{2 * 10^6 \left(\frac{Muestras}{segundo} \right)}{1024 \left(\frac{kSimbolos}{segundo} \right)} \quad (3)$$

Sin embargo, según la ecuación (1), si reducimos el ancho de banda de 32 KHz a 4 KHz decimamos las muestras, lo cual reduciría la cantidad de símbolos necesarios y por lo tanto podríamos aumentar las muestras por símbolo como 16 [PINAR2011].

Es por ello que se decide decimar en un factor de 8 para lograr transmitir, tales cálculos se muestran en las ecuaciones (4), (5) y (6) las cuales representan la tasa de bit necesaria, la tasa de símbolos y las nuevas muestras por símbolos para enviar.

$$128 (kbps) = 4(KHz) * 32 (bpM) \quad (4)$$

$$128 (KS/s) = \frac{128(Kbps)}{1 (bpS)} \quad (5)$$

$$16 (MpS) = \frac{2 * 10^6 (Mps)}{128 * 10^3 (bps)} \quad (6)$$

El índice de modulación que se elige es de 1.05. La desviación se calcula con la ecuación (7), la sensibilidad es un valor que se introduce en GNURadio se calcula en la ecuación del modulador FSK (8) por último el ancho de banda necesario se calcula según la regla de Carson en la ecuación (9).

$$\Delta f (Hz) = \frac{128(kbps) * 1.05}{2} = 67.2 (KHz) \quad (7)$$

$$Sensibilidad = \frac{2 * \pi * 67.2(KHz)}{16 (MpS) * 128 (Kbps)} = 0.2111 \quad (8)$$

$$BW = 2 * (67.2 + 128) KHz \approx 390.4 KHz \quad (9)$$

4.3.1. Esquema del transmisor

El transmisor se muestra en la Figura 8, el esquema de transmisor consta de un bloque que importa el audio WAV, una señal flotante a la cual se decima la señal en el bloque de re-muestreo racional, en el bloque de codificación de paquetes se codifica para obtener bytes y ser modulados en conjunto por el bloque modulador GFSK, ambos bloques deben trabajar en conjunto. Finalmente es transmitido por la USRP1 para ser elevado a la frecuencia de 6 MHz.

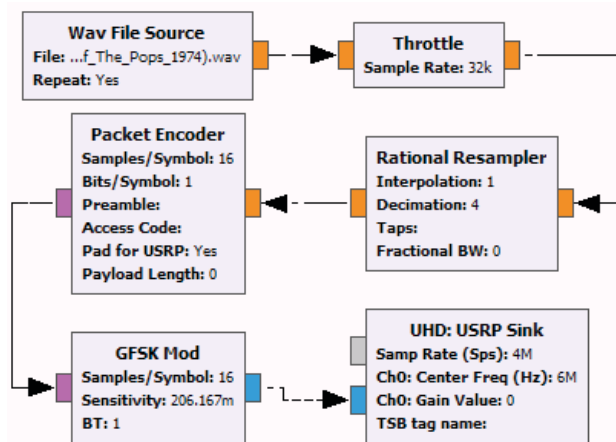


Figura 8: Transmisor

4.3.2. Esquema del receptor

El esquema de recepción se muestra en la Figura 9, en la recepción el bloque fuente de la USRP convierte la señal que estaba en alta frecuencia de una señal, la cual es convertida a banda base y filtrada por un filtro paso baja para eliminar parte del ruido, aplicar la demodulación y decodificarla mediante los bloques de demodulación y decodificación respectivos, por último, es interpolada y enviada al bloque de audio que lleva el sonido a los parlantes.

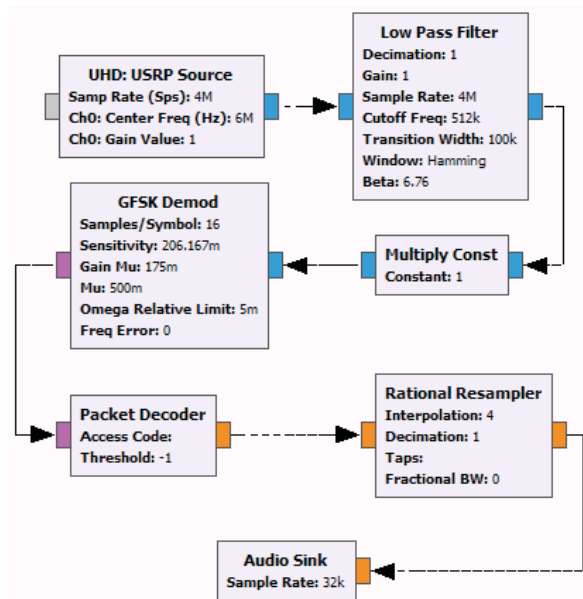


Figura 9: Recepción

4.4. Diseño de los acopladores

Tomando los datos de [SCHENK2008], se utiliza el diseño de placas paralelas cuadradas de 3x3 cm y de separación de 1 cm. Para garantizar la separación, se utiliza un bloque de madera que garantiza esta separación, como se aprecia en la Figura 10 donde se aprecia la separación de los transceptores, estos están conectados a un cable RG58 y separados por un bloque de madera de 1 cm, en la Figura 11 se muestra la vista aérea de los acopladores, los cuales, están hechos de baquelita.

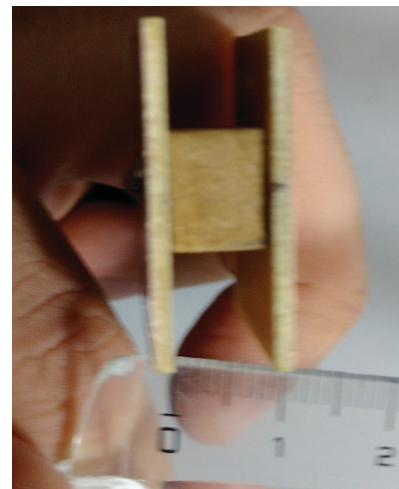


Figura 10: Separación entre acopladores

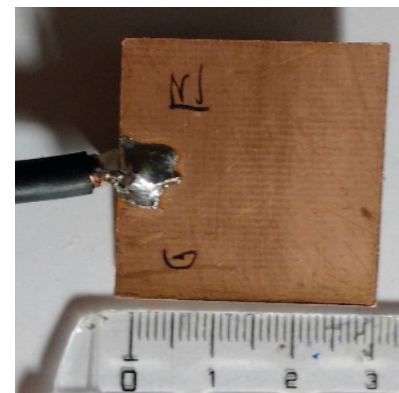


Figura 11: Tamaño de acopladores

5 Resultados

Como se vio en la Figura 6, se tiene una mejor adaptación al estar cerca del cuerpo, no solo eso, también se puede mejorar el desempeño si se añade una red de adaptación al circuito.

En la Figura 12 se representa una fracción del audio enviado de 1 segundo a partir de los 20 segundos y su espectro en frecuencia, y en la Figura 13 representa la recepción del audio durante las mismas circunstancias, se puede observar que existe diferencias entre la señal de audio recibida y enviada, esto es debido a la interpolación del audio, donde se pierde calidad para poder ser transmitida.

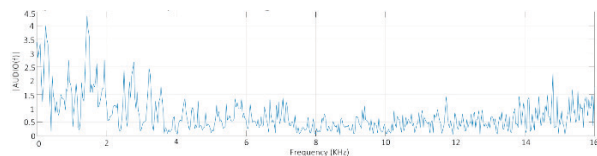


Figura 12: Espectro del audio transmitido

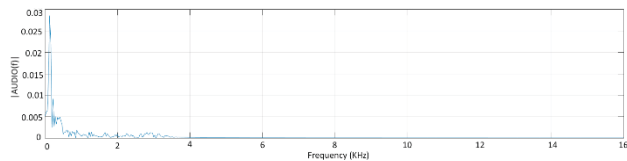


Figura 13: Audio recibido

6 Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se diseñó un sistema de comunicaciones que utiliza la tecnología de BCC. Se puede observar que el canal acoplado al cuerpo nos brinda una mejor ganancia en la primera decena del espectro de frecuencia en MHz, más específicamente, en la frecuencia de 13 MHz se tiene la menor pérdida de atenuación de -53 dB, permitiendo una ganancia de hasta 27 dB y una atenuación mínima de -80 dB en comparación a un canal sin acoplamiento, por lo que se comprueba el confinamiento en el área corporal. Se debe mencionar que la frecuencia con la respuesta más plana es la que se encuentra alrededor de 6 MHz. Se puede observar que también es muy sensible en las bandas menores de 1 MHz, logrando captar mayores potencias, por lo que el canal se ve fuertemente influenciado por la interferencia, por lo que se necesita un sistema de modulación fuerte contra este tipo de señales no deseadas.

La respuesta del VNA corrobora los datos, ya que los resultados son más precisos, es mucho más confiable, no solo eso, es posible usar una red de adaptación para poder tener un mejor desempeño, también se ve que la frecuencia de trabajo del cuerpo empieza en 1 MHz en adelante, donde tiende a ser plana.

Agradecimientos

Agradezco a Lucía Cuellar por brindarme las facilidades de laboratorio CAT de la universidad para poder realizar este trabajo, también a Alana Núñez con la asistencia para las mediciones, al doctor Alex Cartagena por ser mi guía en este trabajo, finalmente a mi familia por el apoyo incondicional, moral y económico.

Referencias bibliográficas

- [ATTARD2012] Attard, S. and Zammit, S. (2012). An empirical investigation of the capacitive body coupled communications channel for body area networks. In *Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems (BioWireless)*, 2012 IEEE Topical Conference on, pages 85–88. IEEE.
- [BAE2012] Bae, J., Cho, H., Song, K., Lee, H., and Yoo, H.-J. (2012). The signal transmission mechanism on

the surface of human body for body channel communication. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 60(3):582–593.

- [Cavallari2014] Cavallari, R., Martelli, F., Rosini, R., Buratti, C., and Verdone, R. (2014). A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 16(3):1635–1657.
- [HAYASHIDA2016] Hayashida, Y., Hasegawa, M., Suzuki, A., Shinagawa, M., Kado, Y., and Haga, N. (2016). Radiated noise analysis via human body for intra-body communication. *Measurement*, 89:159–165.
- [KAZIM2015] Kazim, M. I., Kazim, M. I., and Wikner, J. J. (2015). Realistic path loss estimation for capacitive body-coupled communication. In *Circuit Theory and Design (ECCTD), 2015 European Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- [LINNARTZ2013] Linnartz, J.-p. (2013). Rules of thumb for predicting path loss in body coupled communication channels. In *Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2013 IEEE 20th Symposium on*, pages 1–6. IEEE.
- [PEREIRA2015] Pereira, M. D., Alvarez-Botero, G. A., and Rangel de Sousa, F. (2015). Characterization and modeling of the capacitive hbc channel. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 64(10):2626–2635.
- [PINAR2011] Pinar, I. and Murillo, J. J. (2011). Laboratorio de comunicaciones digitales radio definida por software.
- [SAZONOV2014] Sazonov, E. and Neuman, M. R. (2014). *Wearable Sensors: Fundamentals, implementation and applications*. Elsevier.
- [SCHENK2008] Schenk, T. C., Mazloum, N. S., Tan, L., and Rutten, P. (2008). Experimental characterization of the body-coupled communications channel. In *Wireless Communication Systems. 2008. ISWCS'08. IEEE International Symposium on*, pages 234–239. IEEE.
- [ZEDONG2012] Zedong, N., Tengfei, L., Wenchen, W., Feng, G., and Lei, W. (2012). Experimental characterization of human body communication in shield chamber. In *Proceedings of 2012 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics*, pages 759–762. IEEE.
- [ZHAO2014] Zhao, B., Yang, H., and Lian, Y. (2014). A novel quasistatic channel enhancing technique for body channel communication. In *Circuits and Systems (ISCAS), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1094–1097. IEEE.