ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Aplicación Práctica en Telemedicina: Diseño e Implementación de un Sistema de Transmisión de Señales Cardiacas a través de una Red Celular

Pablo Medina Cáceres, Octavio Criollo Ortiz, Ing. Dennys Cortez A.
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo vía Perimetral Km 30.5, 09015863, Guayaquil, Ecuador
pablo_durst@yahoo.com, octaviocriollo@hotmail.es, dcortez@fiec.espol.edu.ec

Resumen

El avance constante de la tecnología ha permitido que la ciencia médica actual disponga de una gran cantidad de equipos de excelentes prestaciones, tamaños y costos reducidos. Además se han producido mejoras en la forma de visualizar las señales biomédicas desde los anticuados registros con pluma entintada y papel termosensible, hasta computadoras con diversos programas de digitalización y procesamiento de señales. Sin embargo, la tecnología no se detiene en ese punto puesto que hoy en día también es posible disponer de equipos médicos portátiles que agregándoles la capacidad de transmitir de manera inalámbrica las señales biomédicas, permiten obtener un excelente sistema para proveer servicios de salud a distancia. Con esto se facilita el acceso a servicios médicos especializados para personas localizadas en sectores remotos donde la disponibilidad de estos servicios es escasa. El presente trabajo expone una aplicación práctica en telemedicina, mediante la cual se desarrollará un modelo para el análisis de la viabilidad de transmitir una señal cardiaca utilizando como medio de transmisión la infraestructura celular.

Palabras Claves: *Telemedicina, señal cardiaca, EKG, derivaciones bipolares, puertos de audio.*

Abstract

The constant advancement of technology has enabled that medical science today has a great quantity of equipments with excellent features, sizes and reduced costs. In addition the way to visualize biomedical signals has been improved from antiquated registers with inked feather and thermosensitive paper until computers with different softwares of digitalization and signals processing. However the technology do not stop here since, nowadays also is possible to have portable medical equipments with the capacity to transmit wirelessly biomedical signals which constitute an excellent system for providing health services at a distance. This facilitates the access to specialized medical services for people located in remote places where the availability of these services is scanty. This project exposes a practical application about telemedicine which will develop a model for analyzing the viability of transmitting cardiac signals using cellular networks.

1. Introducción

El presente trabajo expone el modelado de un sistema de transmisión de una de las señales biomédicas de mayor interés en el campo de la medicina, se trata de la señal cardiaca. Para la transmisión de esta señal biomédica se utilizará la red celular de una operadora móvil del Ecuador. El proceso de transmisión se lleva a cabo mediante el establecimiento de una llamada telefónica entre dos celulares; uno de ellos funcionará como transmisor en el lado del paciente (estación remota) y el otro como receptor en el lado del médico cardiólogo (estación base).

El análisis del proceso de transmisión de señales cardiacas a través de una llamada celular comienza en su primera fase con un análisis espectral del canal de voz de la red celular de la operadora móvil previamente elegida. Este análisis se realiza con la finalidad de seleccionar la portadora que presenta una mejor respuesta en el proceso de transmisión de estas señales cardiacas vía celular. En una segunda fase se diseñará un módulo de adquisición de señales cardiacas lo suficientemente pequeño y portátil como para permitir realizar pruebas de campo, este módulo será capaz de conectarse al computador a través de su puerto de audio por lo que estas señales cardiacas serán tratadas como señales de audio.

En la última fase del desarrollo de este modelo de transmisión de señales cardiacas se diseñará todo un sistema tanto para la adquisición, almacenamiento y filtrado de la señal cardiaca, así como para el tratamiento y procesamiento de la misma y su transmisión mediante el establecimiento de una llamada entre los celulares. Todo este proceso se realizará a través de uno de los entornos de programación considerado como una de las más poderosas herramientas de análisis y simulación: Simulink de Matlab versión 7.

El tratamiento y procesamiento de la señal cardiaca para la transmisión vía llamada celular está conformado por dos etapas: el Sistema Transmisor el cual modulará la señal cardiaca para la transmisión de la misma como audio y, el Sistema Receptor encargado de la demodulación de la llamada recibida y de la recuperación de la señal cardiaca.

2. Descripción del sistema

El eje principal del modelo propuesto para el telemonitoreo de señales cardiacas se basa en la transmisión de la misma como voz mediante el establecimiento de una llamada entre dos celulares: el celular transmisor en el lado del paciente, y el celular receptor en el lado del médico [1].

La comunicación en este sistema es unidireccional, es decir, existirá un único sentido de envió de datos (información cardiaca), debido a que, es la actividad eléctrica del corazón del paciente la que se enviará como voz a través de una llamada celular.

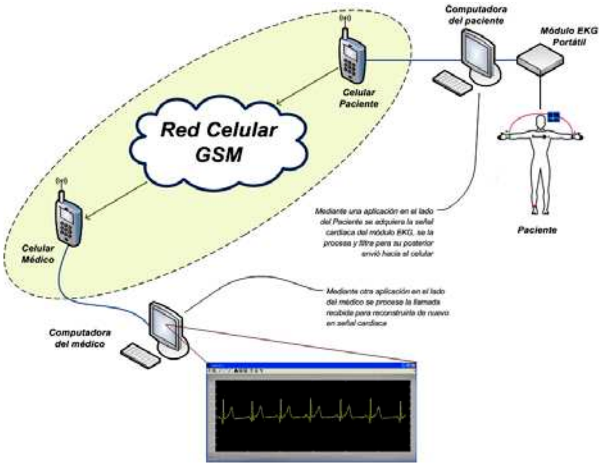

Figura 1. Modelo general del sistema de transmisión.

El modelado de la transmisión de señales cardiacas como voz sobre la red celular requiere de dos tipos de aplicaciones: una aplicación transmisora, mediante la cual se generará el audio con la información cardiaca incorporada en él, y la aplicación receptora, la cual reconstruirá la señal cardiaca a partir de la llamada recibida.

2.1. Modelado del sistema

La infraestructura del sistema está compuesta por dos estaciones: la *estación remota* y la *estación base.*

El modelado de todo el proceso de transmisión se realiza con una de las herramientas de desarrollo más poderosas que existen actualmente para este fin: *Simulink* de MATLAB 2007.

2.2. Descripción de la estación remota

La estación remota es el sitio en el que se encuentra ubicado el paciente o la persona a quien se le realizará el chequeo del corazón, por consiguiente, es este el lugar donde se encontrará ubicado el equipo apropiado para la realización de lecturas cardiacas locales, su procesamiento y almacenamiento.

2.2.1. Elementos de la estación remota. La estación remota está compuesta por tres componentes principales: el módulo de adquisición de señales cardiacas (EKG), la Unidad Remota de Tratamiento de Señales Biomédicas (URTSB) y el equipo transmisor o celular.

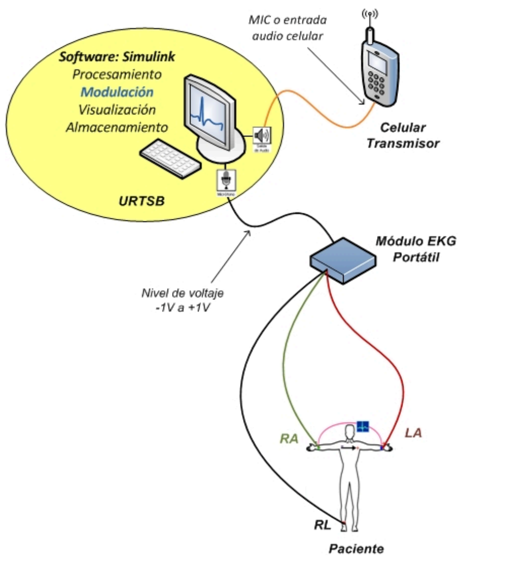

Figura 2. Lado del Paciente (Estación Remota).

El módulo para la adquisición de señales cardiacas (EKG) es un pequeño dispositivo el cual permite leer las señales cardiacas del paciente.

La principal característica de este pequeño módulo es la comunicación con la computadora a través de su puerto de entrada de audio (MIC), reduciendo de esta manera en hardware y ganando simplicidad en el diseño.

La Unidad Remota de Tratamiento de Señales Biomédicas (URTSB) es el componente más importante en la estación remota, mediante el cual se realizan las etapas de: procesamiento, modulación, visualización local para el paciente y almacenamiento de la señal cardiaca. El hardware que constituye el URTSB es una computadora con la respectiva aplicación transmisora desarrollada en Simulink, la cual realizará la interacción tanto con el módulo electrocardiógrafo portátil, como con el equipo transmisor.

El último componente de la estación remota lo constituye el ***equipo transmisor*** o ***celular***, el cual se conecta a la salida de audio de la computadora del paciente (*esto es a través del MIC del celular*). Es indispensable mencionar que cualquier modelo de celular se puede utilizar para la implementación del sistema.

2.3. Descripción de la estación base

La estación base es el sitio de ubicación del médico, quien realizará el chequeo cardiológico de su paciente previa a la recepción de la información cardiaca a través de una llamada celular. En este punto el médico preparará los dispositivos o el equipo a utilizar para el proceso de recepción de la llamada del paciente, la cual contiene información de la señal cardiaca.

2.3.1. Elementos de la estación base. La estación base está constituida únicamente por: el equipo receptor o celular y la Unidad Maestra de Tratamiento de Señales Biomédicas (UMTSB).

El equipo receptor o celular recibe la llamada desde la estación remota en el lado del paciente, y la introduce a la computadora del médico en la estación base a través de su puerto de entrada de audio (MIC). Cabe señalar que la comunicación celular-computadora se realiza a través de los *"manos libres de los celulares"*.

La Unidad Maestra de Tratamiento de Señales Biomédicas (UMTSB) está constituida por la computadora del médico con la respectiva aplicación desarrollada en Simulink. Las funciones del UMTSB son: la recepción de la voz en una llamada celular, recuperación de la información cardiaca contenida en aquella llamada, almacenamiento de la misma en formato audible y su visualización para el respectivo diagnóstico por parte del médico. La señal cardiaca es recuperada mediante un proceso inverso al que se realiza en la estación remota.

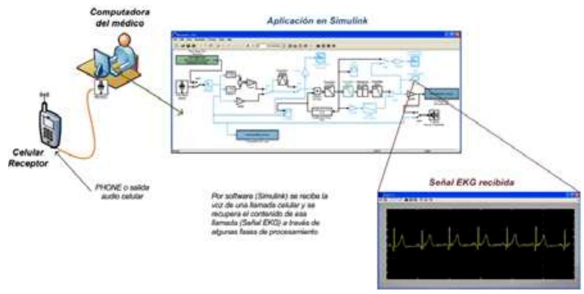

Figura 3. Lado del médico (Estación Base).

3. Diseño y construcción del módulo EKG

El diseño del módulo EKG es diferente a los electrocardiógrafos convencionales, la razón de ello es que el tratamiento de las señales cardiacas se la realiza como señales de audio (voz), es decir, la adquisición de las mismas se lleva a cabo a través de los puertos de entrada de audio de la computadora. Las etapas de diseño del módulo se constituyen en tres partes fundamentales:

- Circuito de instrumentación
- Filtros pasa-altos
- Modulador FM

3.1. Amplificador de instrumentación

El circuito de instrumentación permite leer los potenciales eléctricos del corazón a través de la colocación de electrodos sobre la piel. Aquellos bio-potenciales son extremadamente pequeños, además del ruido en modo común adherida a la señal cardiaca, por ello se requiere de una alta impedancia de entrada y un alto rechazo en modo común, característica que ofrece el amplificador de instrumentación AD620 [2]. En la figura 4 se visualiza el circuito de instrumentación.

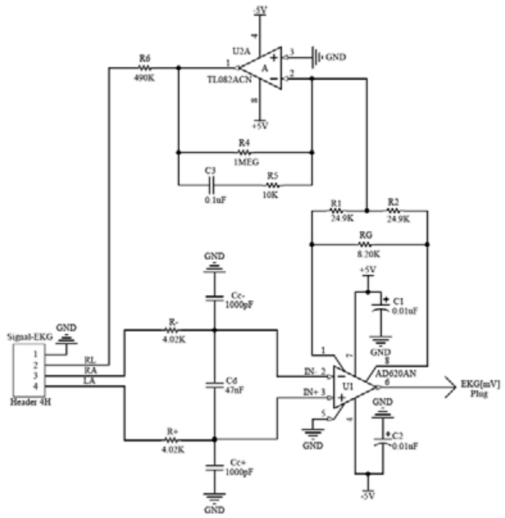

Figura 4. Circuito de instrumentación para un EKG.

3.2. Filtro pasa-alto

El filtro pasa-alto activo de 1er orden para el circuito EKG (figura 5) establece una frecuencia de corte inferior de 0.05Hz el cual permite eliminar cierto tipo de interferencias o perturbaciones como el offset DC que se desarrolla entre los electrodos y la superficie de la piel (casi 300mV), un valor bastante exagerado comparado con la amplitud de la señal cardiaca (apenas 5mV) [3].

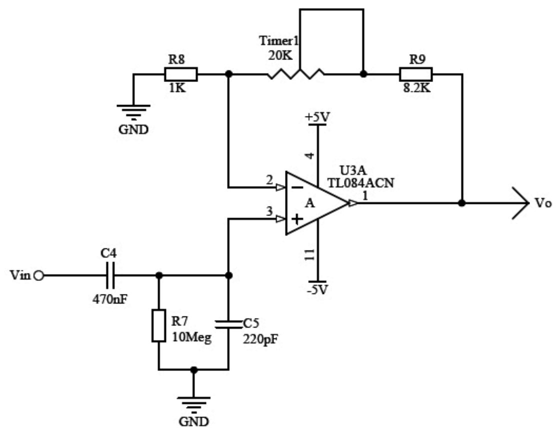

Figura 5. Filtro pasa-alto.

3.3. Modulador FM

Para poder realizar la adquisición de las señales cardiacas a través del puerto de entrada de audio de la computadora, sin que las limitaciones en ancho de banda de aquellos puertos afecten la forma de onda de la señal se requiere realizar ciertas mejoras en el modulo EKG. Estas mejoras consisten en llevar las señales cardiacas a una frecuencia que si es permitida en la banda de paso del filtro incorporado en la tarjeta de audio de la computadora.

La técnica empleada para mejorar el módulo EKG consiste en modular en FM por hardware la señal cardiaca alrededor de una frecuencia central $f_O = 1.75KHz$. Para ello se utilizó el chip 74HCT4046AN [4]. El circuito se muestra en la figura 6.

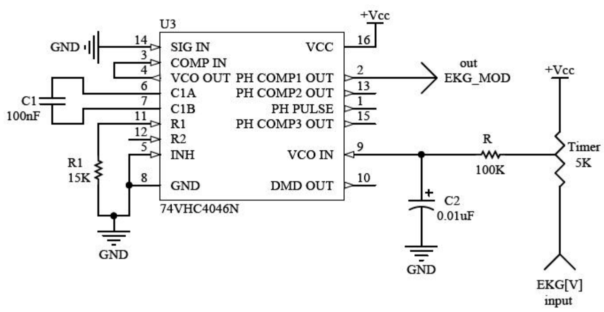

Figura 6. Circuito modulador FM para señales EKG.

La señal introducida por VCO IN es una señal cardiaca con ruido de 60Hz y no limitada a una frecuencia de corte superior de 100Hz, que es el límite superior del ancho de banda de toda señal cardiaca. Todo el proceso de filtrado final de la señal cardiaca se realiza por software mediante Simulink.

4. Análisis espectral de la señal cardiaca

El análisis espectral de la señal cardiaca permite visualizar el rango en frecuencia de los potenciales eléctricos del corazón, los cuales se encuentran en el rango de 0.05Hz a 100Hz. En la práctica se requiere de un equipo llamado "*analizador de espectros*" para poder realizar este tipo de análisis, sin embargo Simulink simplifica este procedimiento al contar con un bloque denominado *"Spectrum Scope"*.

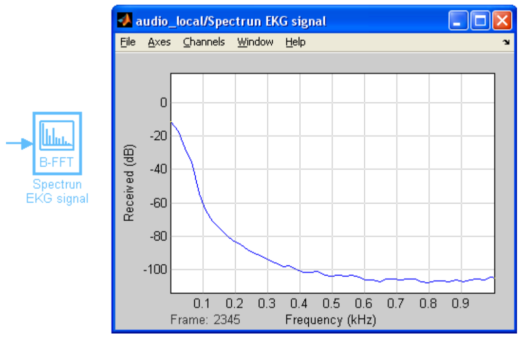

Figura 7. Espectro de la señal cardiaca recibida.

En la figura 7 se aprecia el espectro en frecuencia de la señal cardiaca recibida mediante el establecimiento de una llamada celular en la que se percibe claramente la atenuación de la señal a partir de los 100Hz (límite superior de la señal cardiaca).

5. Adaptación de la señal cardiaca al canal de voz de la red celular

Un análisis cualitativo determinó que la voz enviada en una llamada celular presenta características aleatorias en amplitud, sin embargo la frecuencia es un parámetro el cual permanece invariable, es decir, la frecuencia que se transmite como voz en un celular transmisor, es la misma frecuencia recibida en el celular receptor.

La técnica empleada para transmitir una señal EKG mediante llamada celular es modulando en FM la señal cardiaca alrededor de una frecuencia central f_O. El ***rango optimo de frecuencia*** para aquella frecuencia central, en la cual la información sufre poca o casi ningún tipo de deterioro en la transmisión está entre 2100Hz y 2500Hz.

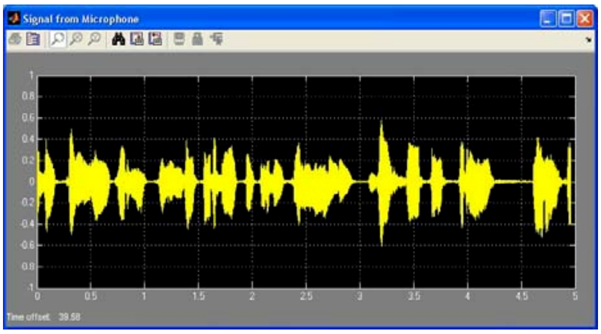

Figura 8. Amplitud variable en una llamada.

Las gráficas siguientes muestran el espectro de frecuencia de una señal sinusoidal de 2100Hz transmitida como voz a través de una llamada celular, así como la señal que se recibe en el receptor. El resultado es visualizado mediante la aplicación Simulink de MATLAB 2007.

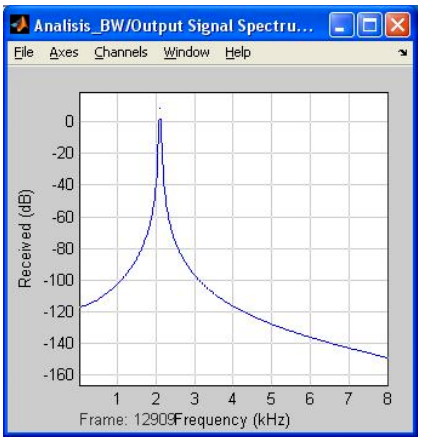

Figura 9. Señal sinusoidal transmitida a 2100Hz.

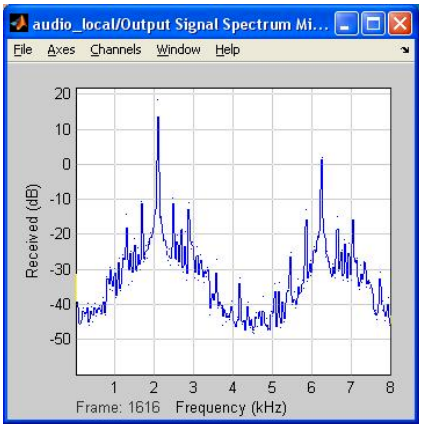

Figura 10. Señal sinusoidal recibida a 2100Hz.

6. Tratamiento de las señales cardiacas con Simulink

Simulink es una poderosa herramienta utilizada para el modelado de sistemas y procesos de diversas categorías. Esta herramienta se aplica a casi todas las ciencias e ingenierías, debido a la amplia variedad de bloques funcionales con las que cuenta en su librería, incluyendo lo que es análisis y procesamiento de audio y comunicaciones.

El tratamiento, procesamiento y visualización de la señal cardiaca se realizó íntegramente en la plataforma Simulink. Para ello se diseño dos tipos de aplicaciones: la unidad remota de tratamiento de señales biomédicas (URTSB) y la unidad maestra de tratamiento de señales biomédicas (UMTSB).

6.1 Diseño de la unidad remota de tratamiento de señales biomédicas (URTSB)

La URTSB es la aplicación en el lado del paciente o estación remota que interactúa con el módulo EKG y con el celular transmisor, sus funciones son: procesar, almacenar, visualizar y modular la señal cardiaca.

El modulo EKG no realiza el procesamiento completo de la señal cardiaca, por ello, todo tipo de procesamiento de esta señal debe realizarse mediante la URTSB. El procesamiento realizado en Simulink incluye el filtrado contra el ruido de 60 Hz, limitación en frecuencia hasta los 100Hz y acondicionamiento o ganancia de la señal EKG (figura 12).

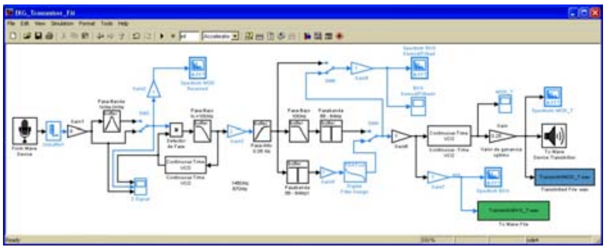

Figura 12. Aplicación de la URTSB (estación remota).

La modulación de la señal cardiaca permite oscilar una portadora mediante software en un rango definido como *"rango optimo de frecuencia"* (2100Hz-2500Hz), en el cual el envió de estas señales cardiacas a través de una llamada celular resulta la más eficiente.

La figura 13 muestra el espectro de frecuencia de una señal sinusoidal modulada en FM alrededor de 2300Hz generado por la URTSB. Esta señal es el audio a transmitir a través de una llamada celular, conectando el celular a la salida de audio de la computadora.

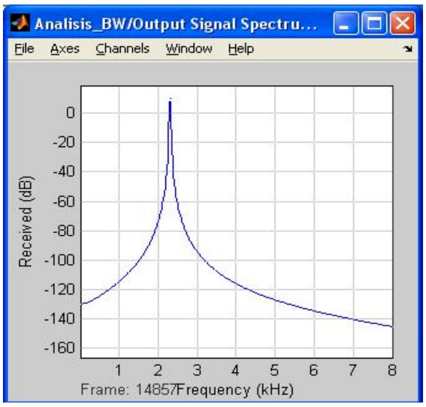

Figura 13. Espectro de frecuencia del audio modulado en el URTSB alrededor de una frecuencia central $f_O = 2300Hz$.

La señal cardiaca y la señal modulada (voz a enviar por celular) son almacenadas en formato audio con el nombre de EKG.wav y MOD_T.wav respectivamente.

La URTSB permite visualizar la señal cardiaca a transmitir (figura 14), su espectro de frecuencia (figura 15) y el espectro de frecuencia del audio de salida hacia el celular generado por la misma URTSB (figura 13).

Figura 14. Señal cardiaca visualizada en el lado del paciente (estación remota).

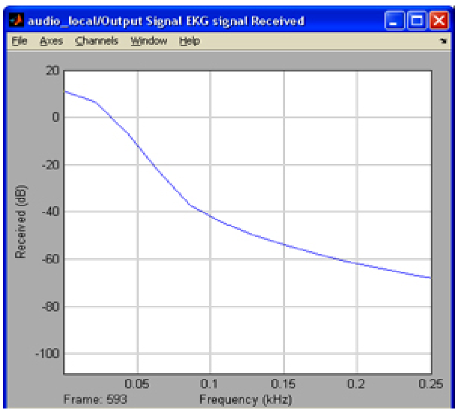

Figura 15. Espectro de frecuencia de la señal cardiaca del paciente en la estación remota.

6.2 Diseño de la unidad maestra de tratamiento de señales biomédicas (UMTSB)

La UMTSB es la aplicación en el lado del médico desarrollada en Simulink (figura 16), y es la encargada de reconstruir la señal cardiaca a partir de la voz en una llamada celular establecida entre la estación base y la estación remota, recibida a través del puerto de entrada de audio de la computadora. Aquel audio (voz) contiene la información de la señal cardiaca adquirida, filtrada, procesada y modulada en FM a una frecuencia central de 2300Hz en la estación remota, por ello en la UMTSB se requiere de un demodulador apropiado diseñado bajo ciertas especificaciones, el cual permita la recuperación de la señal cardiaca del paciente remoto.

También se puede obtener un registro de la señal cardiaca recibida en la estación base almacenándola como audio (formato WAV).

La UMTSB también permite visualizar la señal cardiaca recibida en la estación base (figura 17), su espectro de frecuencia (figura 18) y el espectro de frecuencia del audio de entrada desde el celular hacia la computadora (figura 19).

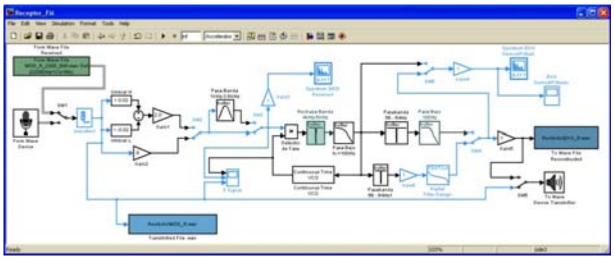

Figura 16. Aplicación de la UMTSB (estación base).

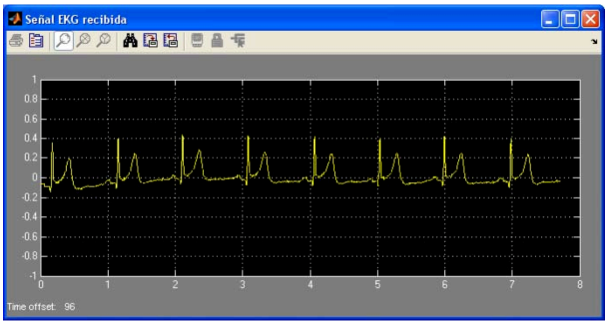

Figura 17. Señal cardiaca recibida en el lado del médico (estación base).

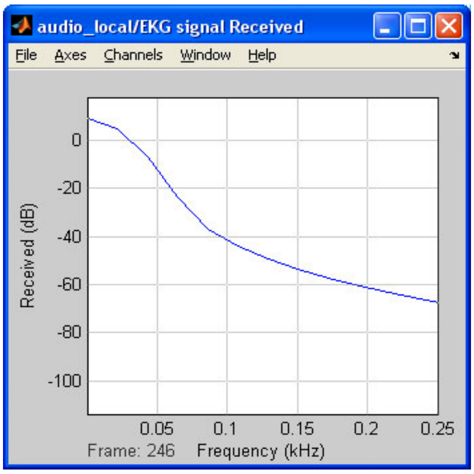

Figura 18. Espectro de frecuencia de la señal cardiaca recibida en el lado del médico.

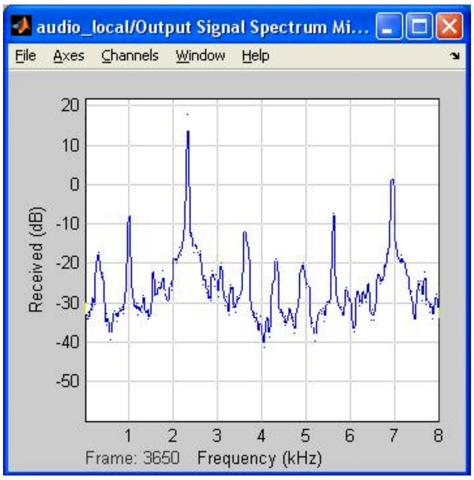

Figura 19. Espectro de frecuencia del audio modulado alrededor de una frecuencia central $f_0 = 2300Hz$. Recibido en la estación base

7. Resultados

El desarrollo del proyecto supuso una gran inversión de tiempo y dinero, sobre todo si se tiene en cuenta que era un proyecto innovador cuyo único objetivo era proporcionar servicios médicos a personas ubicadas en lugares distantes. En la actualidad existe un sinnúmero de sectores en el Ecuador en los cuales no se tiene acceso a servicios médicos especializados como la revisión cardiaca. Si un paciente requiere realizarse un chequeo cardiaco en muchas ocasiones debe trasladarse a las grandes ciudades, lo cual implica pérdida de tiempo y gastos de movilización.

Mediante el desarrollo e implementación del proyecto logramos comprobar la factibilidad de transmitir señales cardiacas mediante el establecimiento de una llamada celular.

Finalmente, se puede decir que el módulo EKG construido cumple con los principales requerimientos en cuanto a tamaño, precio, portabilidad, funcionamiento, facilidad de conexión y compatibilidad con la mayoría de las computadoras fabricadas en la actualidad.

8. Conclusiones

La telemedicina es una técnica que se está desarrollando en el Ecuador a fin de suplir las inmensas falencias que se tienen en cuanto a infraestructura médica, con este proyecto se logró comprobar que la implementación de la telemedicina en el Ecuador es viable en muchos aspectos.

La transmisión de señales mediante el establecimiento de una llamada celular resultó ser un procedimiento factible, gracias al cual se podrá proporcionar servicios médicos, en este caso la revisión cardiaca, a personas que se encuentran en lugares distantes con acceso limitado a hospitales o clínicas especializadas.

El desarrollo de la telemedicina está ligado al compromiso de diversos actores sociales como las operadoras celulares, el Gobierno Nacional y los profesionales de la medicina. Las operadoras celulares deben, de cierta manera, contribuir a bajar los precios de los minutos celulares para proyectos que signifiquen un beneficio a la sociedad en general, como es el caso de la revisión cardiaca a distancia. El Gobierno por su parte debe comprometerse a mejorar la infraestructura médica del país, además de regular a las operadoras en lo que tiene que ver a la calidad de los servicios que ofrecen. Es importante mencionar que si la calidad de las llamadas es mala, la implementación de los servicios de telemedicina correría un grave riesgo, especialmente debido a que se trata de servicios en los cuales la vida de un ser humano se encuentra en riesgo. Los profesionales de la medicina tienen la obligación de mantenerse a la vanguardia de los avances tecnológicos que se producen. Es indispensable que combinen sus conocimientos médicos con las denominadas tecnologías de la información y comunicación (TICS), lo cual permitirá proporcionar servicios médicos de una manera más eficiente.

9. Referencias

[1] Arriarán, Sergio Salas, "Sistema Inalámbrico de Transmisión de Señales Biomédicas," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. [Online] http://www.upc.edu.pe/html/0/0/carreras/ing-electronica/proyectos/TelemedicinaInalambrica.pdf.

[2] Analog Devices, "Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier, AD620," [Online] www.datasheetcatalog.com. [Online] 1999.

http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/105505445AD620_e.pdf.

[3] Tecnológica de la ESPOL, “Monitor de Electrocardiografía a través de una Computadora Personal,” [Online], Octubre, 2005. http://www.rte.espol.edu.ec/archivos/Revista_2005/54.pdf.

[4] Philips Semiconductors, “74HC/HCT4046A Phase-locked-loop with VCO,” [Online] http://www.alldatasheet.com. Noviembre 25, 1997. http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15609/PHILIPS/74HCT4046A.html.