

Artículo corto

Arquitectura de un Sistema de Monitoreo Radioeléctrico usando Software Defined Radio

Architecture of a Spectrum Monitoring System Using Software-Defined Radio

Adriana Arteaga Arce

aaarteaga@icesi.edu.co

Grupo de Investigación en Informática y

Telecomunicaciones izt

Universidad Icesi

Fecha de recepción: Octubre 26 de 2012

Fecha de aceptación: Diciembre 12 de 2012

Palabras clave

Monitoreo del Espectro; SDR;
Espectro radioeléctrico; USRP;
GNU Radio.

Keywords

Spectrum monitoring; Software
Defined Radio; USRP; GNU
Radio; Spectrum.

Colciencias
tipo 4

Resumen

El monitoreo de Espectro Radioeléctrico es una tarea fundamental que deben realizar todas las administraciones para controlar y vigilar su utilización. Sus principales componentes son los equipos de monitoreo (i.e., analizadores de Espectro, antenas y GPS) que están dispuestos en lugares estratégicos a lo largo de un territorio para obtener información sobre las características de los servicios de radiocomunicaciones. Es de especial interés complementar dicho despliegue con equipos más sencillos y de fácil transporte, para obtener la mayor cantidad de información del espectro, principalmente en zonas a las que no se puede llegar a través de la red principal de monitoreo. Una alternativa para implementarlos es *Software Defined Radio* (SDR), una técnica que permite construir dispositivos que permiten reemplazar algunos componentes de hardware por rutinas de software, reduciendo así sus costos y tamaño. En la industria existen diferentes equipos y herramientas de programación para construirlos, que permiten el desarrollo de sistemas flexibles, fácilmente actualizables y diseñados para tareas específicas. Este artículo describe los componentes principales de un sistema de monitoreo desarrollado con SDR, y las herramientas más utilizadas para implementarlo.

Abstract

Spectrum monitoring is an essential task to be performed for a country administration to control and monitor its use. Its main components are the monitoring equipment (i.e. spectrum analyzers, antennas and GPS) which are arranged in strategic locations throughout a territory to get information about the characteristics of radio services. There is a special interest to complement this system with simpler and more portable equipment, to get much spectrum information, mainly in areas that cannot be reached through the main monitoring network. An alternative is to use *Software Defined Radio* (SDR), a technique to build devices that can replace some hardware by software routines, thus reducing costs and size. In industry there are different equipment and programming tools to build flexible devices, easily upgradeable and reconfigurable for specific tasks. This paper describes the main components of a monitoring system developed with SDR, and the tools used to implement it.

I. Introducción

El interés por vigilar y controlar el uso del Espectro radioeléctrico (ERE) aumenta a nivel mundial, teniendo en cuenta el crecimiento de la demanda de frecuencias, principalmente por parte de los operadores de telecomunicaciones móviles que buscan ampliar sus servicios usando tecnologías de mayor capacidad como *Long Term Evolution* (LTE), y el surgimiento de nuevos servicios como la televisión digital. Un componente importante en este proceso es el *Sistema de Gestión de Espectro* que facilita la administración, el control y la vigilancia de todos los aspectos derivados del uso del ERE, como son la asignación de bandas de frecuencias, el otorgamiento y la renovación de licencias, el cobro por su explotación y el cumplimiento de los parámetros técnicos para la prestación de servicios de telecomunicaciones. Para llevar a cabo este último punto es necesario disponer de un sistema de monitoreo conformado por equipos y planes de mediciones, que a ser ejecutados verifiquen el cumplimiento, por parte de los usuarios del sistema, de los acuerdos y regulaciones definidas internacional y localmente.

La adquisición de dichos equipos representa una inversión de alto costo si se quiere garantizar la capacidad de control y reacción del sistema ante usos indebidos del ERE. Adicionalmente, las funcionalidades de los equipos convencionales están restringidas por su configuración de hardware, por esta razón la ampliación de las tareas de Monitoreo implican el remplazo total de un equipo determinado o la compra de un dispositivo adicional. Con el surgimiento de conceptos como SDR, la posibilidad de implementar dispositivos de monitoreo de ERE utilizando rutinas de software para realizar tareas típicamente ejecutadas por componentes físicos, resulta de gran utilidad, no sólo por la reducción de costos asociados a la compra y renovación de equipos, sino porque permite su reconfiguración facilitando la ampliación del sistema con nuevas funcionalidades.

Este artículo describe los componentes principales de un sistema de monitoreo desarrollado con SDR, que surge como parte del proyecto *Sistema de Monitoreo del espectro radioeléctrico usando Software Defined Radio y TESMonitor*, desarrollado en la convocatoria *Jóvenes Investigadores* de Colciencias. En la Sección II se encuentra una explicación general de SDR. La Sección III contiene un resumen de varias herramientas útiles para la implementación de un dispositivo con SDR. La sección IV muestra las alternativas para desarrollar un receptor con funcionalidades de *Analizador de Espectro* utilizando SDR, a partir de su versión convencional implementada en hardware. Las conclusiones se encuentran en la sección V.

II. Software defined radio (SDR)

SDR es un concepto propuesto por Joe Mitola (1995), que hace referencia a la posibilidad de construir dispositivos electrónicos para sistemas de radiocomunicaciones,

reemplazando algunos componentes físicos mediante módulos hechos en software. Inició en el campo militar con el proyecto *SpeakEasy* (Lackey & Upmal, 1995) que logró la interoperabilidad de diez tecnologías de comunicaciones utilizadas por las *Fuerzas Armadas de los Estados Unidos*. Posteriores desarrollos popularizaron esta técnica, llevándola a impactar en el campo académico y comercial. Las ventajas más relevantes de usar SDR están relacionadas con la reducción de los costos y el tamaño de los dispositivos –porque se utilizan menos componentes hardware– y la flexibilidad para reconfigurar sus funcionalidades, como resultado de su implementación en software.

Existe un interés particular en el desarrollo de receptores con SDR que sean capaces de recibir señales de diferentes tecnologías, para dar paso a los *Sistemas de Radio Reconfigurables* (RRS por sus siglas en inglés), capaces de soportar diferentes estándares usando equipos que puedan variar su configuración dependiendo de las necesidades del usuario (Dejonghe et al., 2007). Para llegar a esto, es necesario combinar SDR con Radio Cognitiva (CR por sus siglas en inglés), de manera que un dispositivo esté en capacidad de tomar decisiones de acuerdo con las condiciones de su entorno, usando CR, y modifique sus parámetros de configuración para ejecutarlas (Raut & Kulat, 2011).

En el caso de un receptor implementado con SDR, sus funciones básicas de recepción se pueden ampliar, no sólo para ser usado en RRS sino para realizar procesamiento adicional de la señal recibida e identificar características que permitan obtener información sobre el servicio responsable de su emisión, convirtiéndose así en un analizador de espectro básico.

III. Componentes para implementar un dispositivo con SDR

Cualquier elemento de radiocomunicaciones implementado con SDR requiere, básicamente, un dispositivo con módulos de radiofrecuencia para enviar, recibir y procesar señales radioeléctricas y un conjunto de librerías con las que se puedan implementar las rutinas para controlar el hardware y las funciones de los elementos que serán reemplazados por software. En el mercado se encuentran disponibles dispositivos especializados para SDR y librerías –gratuitas, pagas, de código abierto y propietarias– que han surgido como desarrollo de proyectos de investigación en universidades y centros de investigación.

A. Hardware

La Tabla 1 muestra una descripción general de dos dispositivos populares que se han usado para implementar receptores con SDR.

Universal Software Radio Peripheral es un producto elaborado por Ettus Research, diseñado para implementar aplicaciones de radiofrecuencia de hasta 6 GHz. Actualmente tiene disponible tres versiones: Bus, Embeded y Network, y una tarjeta adicional que determina el rango de frecuencias para su funcionamiento (Ettus Research, 2012). Entre los proyectos implementados con este dispositivo se encuentra Open BTS (Range Networks, s/f), una aplicación que se comporta como una estación

Tabla 1. Hardware para la implementación de un dispositivo con SDR

| | Universal Software Radio Peripheral (USRP) | SignalHound |
|--------------------------------|---|---|
| Fabricante | Ettus Research | Test Equipment Plus |
| Rango de Frecuencias alcanzado | DC hasta 6 GHz | 1 Hz - 12,4 GHz |
| Funcionalidades | * De propósito general | * Funcionalidades básicas de Analizador de ERE |
| | * Compatible con GNU Radio, MATLAB, OSSIE | * Software propietario para desarrollo de módulos |
| | * Conectividad con una interfaz Gigabit Ethernet | * Interfaz de conexión USB 2.0 |
| | * Compatible con Linux, Windows y Mac | * Compatible con Windows XP y Windows 7 |
| | * Bus: Básico. Necesita un dispositivo que lo controle | * USB-SA44B: Analizador de ERE de 1 Hz a 4.4 GHz |
| | * Networked: Con capacidad MIMO. Necesita un dispositivo que lo controle | * USB-SA124A: Analizador de ERE de 100 kHz a 12.4 GHz |
| | * Embedded: Incluye una versión embebida de Ubuntu y GNU Radio, no necesita controlador adicional | * USB-TG44A: Generador de señales de 10 Hz a 4.4 GHz |
| Precio | Bus: US\$ 650 - US\$ 849 | USB-SA44B: US\$ 919 |
| | Embedded: US\$ 1,300 - US\$ 1,500 | USB-SA124A: US\$ 1,995 |
| | Networked: US\$1,500 - US\$ 1,700 | USB-TG44A: US\$ 599 |

base GSM a través de la que se pueden realizar llamadas sin utilizar la infraestructura de telecomunicaciones existente.

Signal Hound es un dispositivo para SDR desarrollado por Test Equipment Plus, para implementar aplicaciones de radiofrecuencia (Test Equipment Plus, 2010). Actualmente está disponible una versión que implementa las funcionalidades básicas de un analizador de espectro para uso investigativo, que puede llegar hasta los 12,4 GHz.

B. Software

Para controlar el hardware e implementar las funcionalidades del dispositivo se debe usar un conjunto de librerías o herramientas con capacidad para el procesamiento de señales. La Tabla 2 resume las dos más utilizadas en investigación.

GNU Radio es un conjunto de herramientas gratuitas y de código abierto para implementar aplicaciones SDR. Combina la programación en lenguajes como *Python* y *C*, lo que facilita la administración de recursos y la ejecución de tareas. Adicionalmente,

Tabla 2. Herramientas de Software para implementar un dispositivo con SDR

| | GNU Radio | MATLAB |
|--------------------------------------|--|--|
| Fabricante | Ettus Research | The MathWorks |
| Licenciamiento | Gratuito | Pago |
| Lenguajes de programación soportados | Python C | Lenguaje propietario |
| Funcionalidades | <ul style="list-style-type: none"> * Procesamiento Digital de Señales * Librerías específicas para conexión con USRP * Código abierto | <ul style="list-style-type: none"> * Modelamiento matemático * Procesamiento Digital de Señales * Módulo específico para conexión con USRP * Requiere de Simulink y otras herramientas para realizar análisis más exhaustivo de la señal |

.....
 tiene una aplicación para programar mediante una interfaz gráfica, arrastrando componentes y configurándolos de una manera más sencilla. Está disponible para sistemas operativos Linux, Windows y Mac, y es compatible con todas las versiones de USRP. Con estas librerías se desarrolló Open BTS (GNU Radio, s/f).

Matlab es una herramienta para programación, análisis de datos y modelamiento matemático. Soporta la conexión con dispositivos USRP a través de *Simulink* y facilita el análisis de la información utilizando sus destacadas funcionalidades para el procesamiento digital de señales. El costo de su licencia comercial es alto y requiere la utilización de paquetes adicionales como *Communications System Toolbox*, *DSP System Toolbox* y *Signal Processing Toolbox*, que deben ser licenciadas por separado (MathWorks, s/f).

IV. Arquitectura de un receptor implementado en SDR

La Figura 1 muestra la arquitectura convencional de un receptor construido completamente con hardware. En él, una vez la señal se recibe en la antena, pasa a través de *Filtros Paso Bajo* (BPF) –para eliminar las señales indeseadas– y usando un *Amplificador de Ruido Bajo* (LNA) y un *Controlador de Ganancia Automático* (AGC) y es llevada a una frecuencia intermedia para que su amplitud sea compatible con la requerida por el *Convertor Análogo a Digital* (ADC) (Reed, 2002). Este elemento tiene un componente análogo que se encarga de recibir la señal y un componente digital que la entrega, de tal manera que pueda ser procesada con mayor facilidad. Tradicionalmente todos los elementos han sido construidos usando hardware, lo que limita la posibilidad de ajustar sus parámetros para utilizar los mismos recursos en la manipulación de señales de diferente frecuencia o con diferente modulación.

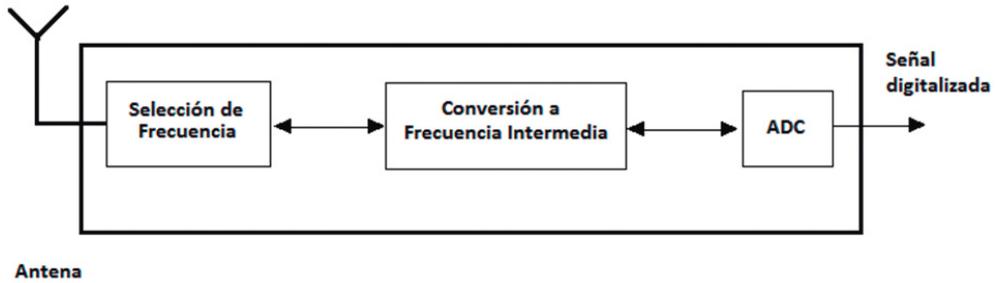


Figura 1. Arquitectura convencional de un receptor

En el caso del Espectro Radioeléctrico, SDR es una herramienta muy atractiva para desarrollar sistemas de monitoreo, principalmente por la variedad de funcionalidades que es posible añadir al sistema a través de software, disminuyendo así considerablemente su costo. La mayoría de los grandes fabricantes de este tipo de sistemas utiliza técnicas SDR en la actualidad. El monitoreo de Espectro básicamente consiste en identificar las características de una señal para determinar si su emisión cumple con las condiciones técnicas y legales definidas por la regulación del uso de este recurso. Para hacerlo, el receptor barre el Espectro, capta todas las señales presentes en él y las envía al componente del sistema capaz de procesarla e identificar sus características; este componente llamado *Analizador de señales* es completamente digital y recibe la señal digitalizada en el receptor y la procesa para extraer los datos que le permitan establecer la frecuencia de la señal, su potencia y energía, para luego ejecutar tareas de monitoreo como son las mediciones de *Radiación No Ionizante (RNI)* y ocupación de canal, entre otras. El analizador de señales, por lo general, corresponde a un computador convencional o a un sistema embebido, con un procesador de mediana o alta capacidad, memoria y puertos para conectar periféricos; GNU Radio y MATLAB son algunas de las herramientas usadas para implementar el procesamiento de las señales. Ambos componentes son independientes, y funcionan en dispositivos separados que se comunican a través de una interfaz (e.g., LAN, Serial, USB).

El primer acercamiento para optimizar el rendimiento de todo el sistema consistió en construir el *Receptor* usando SDR. La Figura 2 muestra la arquitectura del sistema de monitoreo usando un receptor implementado con SDR y el analizador de señales. Como ya se mencionó, algunos de sus componentes no pueden ser construidos por software, como es el caso de la antena y el conversor análogo digital; los demás componentes pueden ser construidos por software, lo que facilita su reconfiguración para permitir la manipulación de señales con diferentes características. No obstante, es necesario tener en cuenta los parámetros de los componentes hardware, como las frecuencias captadas por la antena y la tasa de muestreo del ADC, puesto que pueden influir en la configuración de los demás componentes, como es el caso de la frecuencia intermedia a la que será ajustada toda señal para ser procesada. La ventaja de esta implementación del receptor es que amplía sus capacidades para utilizarlo en diferentes

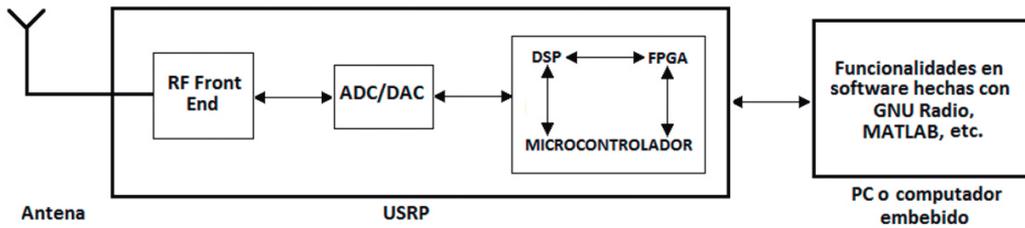


Figura 2. Arquitectura convencional de un Sistema de monitoreo

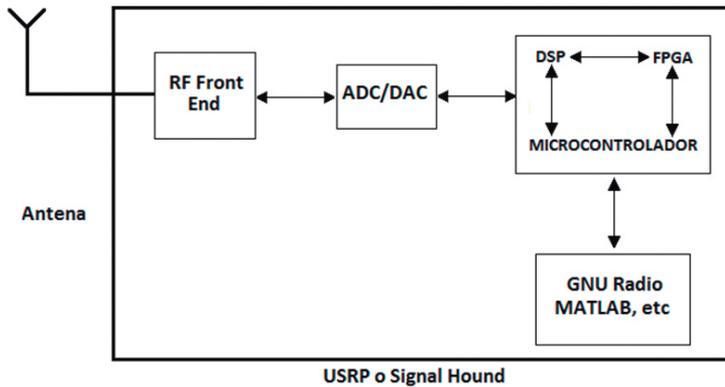


Figura 3. Arquitectura de un Sistema de monitoreo embebido usando SDR

..... sistemas de radiocomunicaciones, porque ajustando algunos parámetros el dispositivo, puede captar señales a diferentes frecuencias, sin necesidad de hardware adicional. En cuanto al analizador de señales, sus funcionalidades no cambian considerablemente; sin embargo en algunos casos la herramienta para SDR utilizada en el receptor, debe ser usada también para implementar las funciones de procesamiento de señales.

La siguiente alternativa para el sistema de monitoreo consiste en integrar el receptor construido con SDR y el analizador de señales en un mismo dispositivo, para facilitar su uso y reducir los costos, como se muestra en la Figura 3. Como ambos componentes están en un mismo equipo, es necesario hacer uso eficiente de los recursos compartidos (i.e. la memoria y el procesador), por lo que las funcionalidades del receptor y del analizador de señales deben optimizarse. En la industria ya es posible encontrar dispositivos que permiten embeber ambas funcionalidades en un solo equipo; no obstante, es necesario revisar la capacidad de procesamiento que soportan porque en algunos casos se realizan tareas de alta carga computacional, para las que es más adecuado tener ambos componentes separados y aprovechar la velocidad de procesamiento de un computador convencional, que es mayor a la de un dispositivo embebido.

V. Implementación del sistema de monitoreo usando SDR

Para el desarrollo inicial del sistema de monitoreo de este proyecto se siguió la arquitectura mostrada en la Figura 2, utilizando un USRP Bus (USRP2) y GNU Radio,

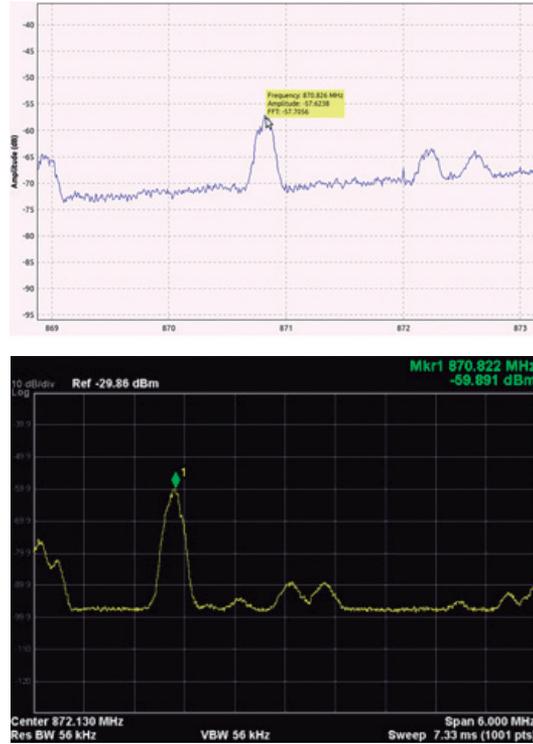


Figura 4. Comparación entre las señales obtenidas con el analizador convencional y el USRP e implementando las funcionalidades básicas de un Analizador de ERE para que reciba la señal y muestre su comportamiento en el dominio de la frecuencia. La validación de su funcionamiento se hizo comparando la semejanza entre la señal recibida por el Analizador de Espectro *Agilent EXA N9010A* y la obtenida por el USRP, tal como se observa en la Figura 4.

La forma de ambas señales es semejante; presenta el mismo comportamiento en términos de potencia máxima en 870 MHz, y en las frecuencias adyacentes. Cabe mencionar que un analizador convencional tiene más precisión para tomar mediciones y mostrarlas, en comparación con lo realizado por el Analizador básico implementado en un USRP, teniendo en cuenta algunas limitaciones de las funcionalidades básicas implementadas en este último, que serán optimizadas para cumplir con las recomendaciones UIT. Sin embargo, esta primera verificación indica que es viable continuar implementando tareas para sensar y monitorear el ERE utilizando SDR, y permitir la integración del dispositivo con diferentes plataformas de gestión y monitoreo.

Conclusiones y trabajo futuro

El desarrollo de un Sistema de monitoreo embebido usando SDR representa un aporte importante a la industria y a la academia, teniendo en cuenta su bajo costo y la flexibilidad de sus funcionalidades. Las diferencias entre un analizador convencional fabricado por *Anritsu* o *Agilent* y uno implementado con SDR, además del precio, están relacionadas con la precisión y el tipo de mediciones realizadas, la facilidad para actualizar sus funcionalidades y la comunicación con diferentes plataformas de control, entre otras.

Para implementar un dispositivo con SDR se deben escoger herramientas de hardware y software, y las que se encuentran disponibles en el mercado tienen diferentes características y funcionalidades. En algunos casos un dispositivo de hardware sólo es compatible con unas librerías específicas, por lo que esto se debe tener en cuenta a la hora de adquirirlas. La curva de aprendizaje necesaria en los desarrollos con SDR está determinada principalmente por los lenguajes de programación utilizados para implementar el control y las funcionalidades del dispositivo. La ventaja es que los lenguajes de bajo nivel involucrados facilitan el acceso y la manipulación de los recursos del sistema, permitiendo que las tareas que cada componente debe realizar se definan con la mayor precisión posible.

En el caso del despliegue de un sistema de monitoreo, los equipos necesarios para conformar la red principal y garantizar el cumplimiento de los estándares y la regulación del sector deben contar con el respaldo de fabricantes reconocidos. Adicionalmente requiere el apoyo de nodos de monitoreo móviles, más simples y fáciles de transportar, que sean capaces de tomar mediciones y transmitirlos al sistema central para su análisis. Para llevar a cabo estas funcionalidades un analizador implementado con SDR es una opción viable teniendo en cuenta las características descritas. Su capacidad de procesamiento y conectividad deben ser compensadas con algún dispositivo adicional, como un computador embebido, pero las tareas de procesamiento de señales que se incorporen, lo acercarán progresivamente al nivel de un equipo comercial de gama media y alta. \square

Referencias bibliográficas

- Dejonghe, A., Bougard, B., Pollin, S., Craninckx, J., Bourdoux, A., Ven der Perre, L., & Catthoor, F. (2007). Green Reconfigurable Radio Systems. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 24(3), 90-101
- Ettus Research. (2012). *Product Categories* [en línea] Recuperado de <https://www.ettus.com/product>
- GNU Radio. (s.f.). *Welcome to GNU Radio* [en línea]. Recuperado de <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>
- MathWorks. (s.f.). *Matlab* [en línea]. Recuperado de <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

- Mitola, J. (1995). The software radio architecture. *Communications Magazine, IEEE*, 33(5), 26-38
- Range Networks. (s.f.). *Open BTS Public Release* [en línea]. Recuperado de <http://wush.net/trac/rangepublic>
- Raut, R., & Kulat, K. (2011). SDR design for cognitive radio. Modeling, Simulation and Applied Optimization. En *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization* (pp.1-8). Piscataway, NJ: IEEE
- Reed, J. H. (2002). Radio Frequency Implementation Issues. En *Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering* (pp. 11-53). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lackey, R.I. & Upmal, D.W. (1995). SpeakEasy: The military Software Radio. *IEEE Communications Magazine*, 33(5), 56-61
- Test Equipment Plus. (2010). *Spectrum Analyzers and Measurement Receivers* [en línea]. Recuperado de <http://www.signalhound.com/>

Currículum vitae

Adriana Arteaga Arce

Ingeniera Telemática (2010) y estudiante de la Maestría en Informática y Telecomunicaciones de la Universidad Icesi de Cali. Forma parte del equipo de investigadores del proyecto *Sistema de monitoreo de espectro y benchmarking de sistemas móviles, usando radio software de dominio público* [SIMONES], que desarrolla el grupo de investigación en Informática y Telecomunicaciones [i2T] de la Universidad Icesi. Sus áreas de interés son las comunicaciones móviles y la comprobación técnica del Espectro.