

Desarrollo de un analizador de espectro para el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en la enseñanza de la física

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Development of spectrum analyzer for studying the propagation of the electromagnetic waves on the teaching physics

Javier Eduardo Epeloa¹ y Gustavo Enrique Arias¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Pellegrini 250, CP 2000 Rosario. Santa Fe.

E-mail: jepeloa@gmail.com

Resumen

El estudio de la física involucrada en la propagación de las ondas electromagnéticas requiere de instrumentos que en muchos casos son de difícil acceso para los estudiantes. Esto, en la mayoría de los casos, complica el entendimiento por parte del alumno de los procesos físicos involucrados debido a la falta de experiencias prácticas. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es cubrir este vacío implementando un analizador de espectro que permita realizar experiencias sobre propagación de ondas electromagnéticas simples para alumnos de física de las áreas básicas y avanzadas. Los resultados obtenidos muestran que con una notebook y un receptor tipo USB-DVB-T modificado es posible montar un sistema transmisor y receptor de costo reducido para realizar experiencias de laboratorio.

Palabras clave: Enseñanza de la física; Propagación de ondas electromagnéticas; Experiencias de laboratorio Analizador de espectro.

Abstract

For the studying of the physics involved on the propagation of the electromagnetic waves is required equipment, that in the most of the cases are not accessible by the students. Because of that the understanding of the physicals phenomenon by the students are difficult because the lack of laboratory experiences. The main objective of this work is the implementation of a spectrum analyzer to improve laboratory experiences for studying the propagation of electromagnetic waves for physics students in basics and advances areas. The results show that is possible implement a low cost laboratory using a modified USB-DBV-T receptor.

Keywords: Physics teaching; Electromagnetic wave propagation; Laboratory experiences; Spectrum analyzer.

I. INTRODUCCIÓN

Dada la relevancia de las comunicaciones en este siglo, creemos que es necesario que los estudiantes universitarios de física de nivel básica de carreras de ingeniería tengan una aproximación a los principios elementales de la transmisión de las señales electromagnéticas, que todos empleamos diariamente, en aparatos que usan por ejemplo Wifi, Bluetooth, FM, AM, y un largo etcétera. El instrumental necesario para el desarrollo de experiencias de laboratorio, relacionadas con la propagación de estas señales, resulta de difícil acceso para los estudiantes. La incorporación de nuevas tecnologías permite cubrir este vacío y alcanzar un mejor entendimiento de los conceptos relacionados a las ondas electromagnéticas.

El objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño de un equipamiento accesible para medir la propagación de las señales electromagnéticas, y que sea sencillo de utilizar por los estudiantes. Dando dos casos de usos posibles del mismo que son accesibles para que los estudiantes puedan sacar conclusiones fácilmente. Consiste básicamente en un receptor de televisión digital terrestre adaptado, y un *software*, que permite analizar las señales recibidas en una notebook. Consideramos que este es un enfoque innovador para los programas tradicionales de electricidad y magnetismo.

La continua evolución de la electrónica en todas sus áreas, así como también las computadoras en conjunto con el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación de dispositivos electrónicos han llevado a que el costo actual de todo tipo de dispositivos se vea drásticamente reducido. Se plantea en este trabajo la utilización de los últimos avances de la electrónica en materia de receptores definidos por *software* (SDR), aplicando esto a la implementación de experiencias básicas de laboratorio.

II. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

El incremento de la potencia de cálculo de las computadoras actuales ha permitido que nuevas tecnologías simplifiquen el desarrollo de equipamientos caros como por ejemplo analizadores de espectros (2), analizadores de redes (3), osciloscopios y multímetros por citar solo algunos ejemplos (Machado Fernández, 2014). En lo que respecta al procesamiento de señales, es cada vez mayor la tendencia a digitalizar una señal “lo antes que se pueda” y realizar el procesamiento de la misma de manera digital. Esto no sería posible si la potencia de cálculo de las computadoras no fuera la necesaria para realizar millones de operaciones por segundo y resolver de esta forma complejos sistemas matemáticos (Groshong y Ruscak, 2010).

Desde la década de 1990 en adelante, con el advenimiento de los procesadores de señales DSP (4), se comenzó a trabajar en el concepto de radio definida por *software* (SDR), en la cual se digitaliza la señal proveniente de una antena transformada a banda base (5), para construir el demodulador utilizando un *software* de computadora. En la figura 1, puede observarse un diagrama básico del funcionamiento de un dispositivo transmisor y receptor del tipo SDR. Puede observarse que tiene 3 bloques fundamentales:

1. Amplificador de bajo ruido (low noise amplifier, LNA) (7) que recibe la débil señal proveniente de la antena y un amplificador de potencia (Power amplifier, PA) para elevar la señal de salida y transmitir.
2. Conversores ADC (8) para digitalizar la señal de entrada y DAC (8) transformar al mundo analógico una señal digital y poder transmitir la información al espacio.
3. Microcontrolador o microprocesador que permite interpretar los datos binarios y lograr una sincronización entre estos y un ordenador (Joel y Lowdermilk, 2010).

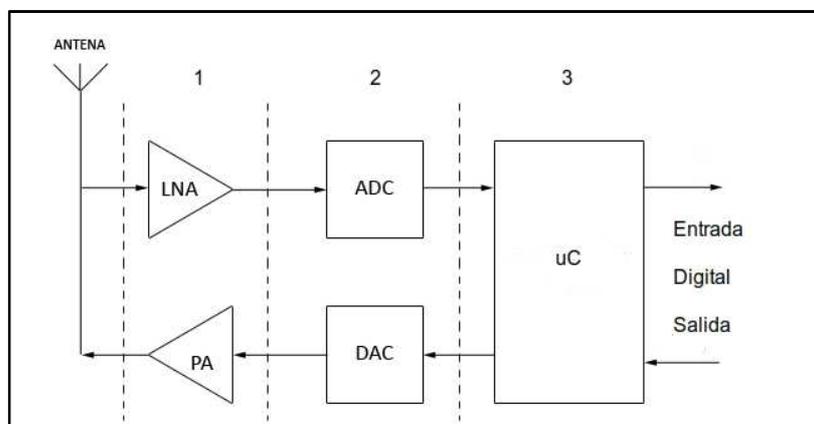


FIGURA 1. Esquema básico de un dispositivo SDR.

Actualmente se suele utilizar un bloque de carácter analógico previo a digitalizar la señal que permite acotar el espectro de la señal a banda base (5). Para esto se mezcla la señal proveniente del LNA (en el caso de recepción, en transmisión se realiza el proceso inverso) con la de un oscilador local (9) y de esta forma se logra trasladar el espectro de la misma eliminando la señal portadora. Esto se realiza con el objetivo de poder acotar la frecuencia máxima de la señal a muestrear y simplificar el convertor ADC y DAC. En el mercado hoy en día pueden encontrarse numerosos dispositivos SDR.

III. RECEPTOR DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE

En la figura 2 se observa una imagen del RTLSDR (11) por dentro, consiste en un dispositivo USB que se diseñó originalmente para la recepción de televisión digital terrestre.



FIGURA 2.Receptor DVB-T.

En el año 2012, el finlandés AnttiPalosaari trabajando con estos dispositivos descubrió que el chip Realtek RTL2832U con el cual funciona el receptor RTLSDR y procesa las señales digitales (ver diagrama en bloques de la figura 1) tenía instrucciones ocultas que permitían que se lo pudiera llevar a un modo de funcionamiento donde transfiere las muestras I/Q (10) en banda base sin procesar por el puerto USB hacia la PC. Gracias a esto se logró desbloquear este receptor y poder utilizarlo para procesar señales desde unos 30Mhz hasta casi los 2Ghz, solo para recibir señales ya que no es posible transmitir con este *hardware*. La gran ventaja de este dispositivo es que es una atractiva opción para desarrollar instrumental de bajo costo (<https://www.rtl-sdr.com/>).

En lo que respecta al *software* de procesamiento, existen infinidad de ellos, pero puede citarse debido a su versatilidad GNU-RADIO (Rosso y otros, 2016), un *software* que solo puede utilizarse en Linux y permite generar los bloques de un receptor o transmisor sin necesidad de escribir código, excepto un pequeño programa escrito en Python, que hubo necesidad de escribir para este trabajo.

Utilizando un dispositivo USB como el RTL-SDR y el GNU-RADIO es posible implementar todo tipo de instrumental con la única limitación de que no es posible transmitir señales.

IV. METODOLOGÍA

Para evaluar funcionalmente la posibilidad de implementar un laboratorio de física experimental utilizando un SDR como el RTLSDR, se adquirió un dispositivo RTLSDR como el de la figura 3



FIGURA 3. Dispositivo RTLSDR.

Se instaló en un sistema operativo Ubuntu 18.04 y el *software* GNURADIO-COMPANION, con el driver correspondiente al SDR que permite vincular el dispositivo con este *software*.

Una vez instalado el *software* se procedió a armar un experimento básico en el cual se desea recibir desde la antena del RTLSDR información del espectro electromagnético en una determinada frecuencia y graficar la misma, el diagrama en bloques montado puede observarse en la figura 4:

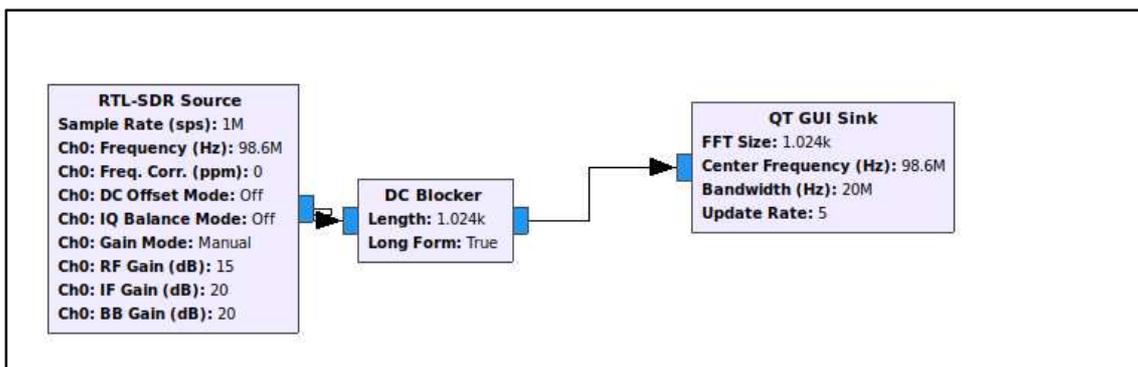


FIGURA 4. Diagrama en bloques de GNUradio para recibir señales.

A. EXPERIENCIA 1

En la figura 5 puede observarse la salida del programa en un gráfico tipo “waterfall” de colores, claramente pueden verse emisoras en las frecuencias cercanas a 93.3Mhz, 98,7Mhz y 98,9 Mhz (señales de radio FM comerciales) con diferentes intensidades relativas. Esta simple experiencia permite la visualización de la propagación de ondas electromagnéticas de radios FM.

La experiencia anterior permite verificar el correcto funcionamiento del RTLSDR como analizador de espectro y, aunque no se pueden realizar medidas en valor absoluto con este dispositivo, ya que las mediciones no se encuentran calibradas, se pueden hacer en relativo para comparar y sacar conclusiones en clase.

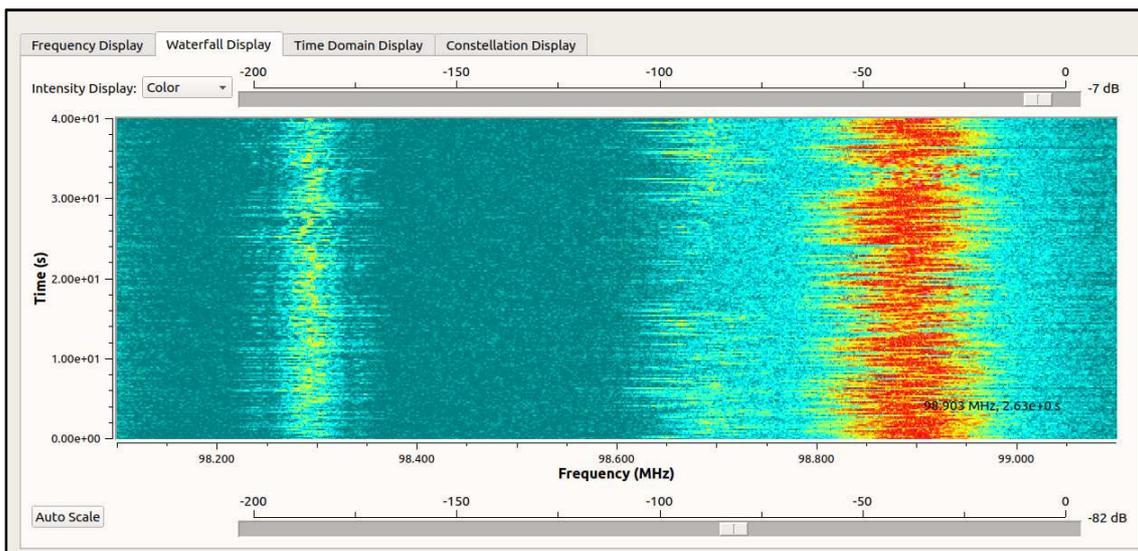


FIGURA 5. Prueba del dispositivo como analizador de espectros en las bandas de FM comercial utilizando GNURADIO.

B. EXPERIENCIA 2

A partir de ese *hardware* y ese *software* base, se dispone de instrumentación de laboratorio para que alumnos de física de áreas básicas y avanzadas puedan realizar simples experimentos como, por ejemplo: visualizar la propagación de una onda en diferentes medios, ya que se puede evaluar la atenuación interponiendo algún material dieléctrico o inclusive conductor y ver el efecto que tiene sobre la propagación. También es posible medir la atenuación del espacio libre, fuertemente vinculada con el vector de Poynting, además estudiar polarización de antenas, entre muchas otras opciones.

Para comprobar la gran versatilidad de este tipo de dispositivos se realizó el montaje de otra experiencia con el objetivo adicional que sea algo muy simple de mostrar en clase para alumnos de física de electromagnetismo y afines. Se determinará la atenuación que sufre una señal electromagnética en función de la distancia a la antena receptora, esta experiencia se denomina *atenuación del espacio libre*.

Como emisor se utilizó un pequeño transmisor en la frecuencia de 434Mhz utilizado en las alarmas de autos. Con dicho transmisor es posible realizar simples experiencias en el aula y fijar conceptos.



FIGURA 6. Experiencia realizada para el cálculo de la atenuación de propagación.

Antes de realizar la experiencia se comprobó el correcto funcionamiento del dispositivo, realizando una medida para verificar el desempeño del emisor y el receptor, los resultados de la medición se observan en la figura 7.

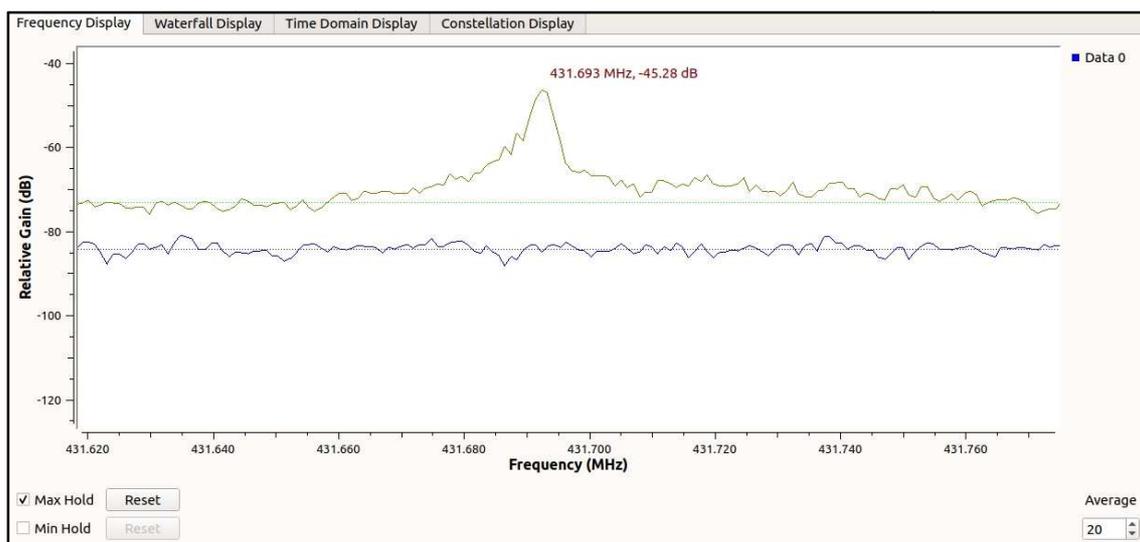


FIGURA 7. Medición en la banda de 433Mhz con el dispositivo emisor

La curva azul corresponde a la medida sin señal y sirve como referencia, mientras que la curva verde es la medición con presencia de señal de transmisión.

Puede observarse la excursión de la señal recibida y se ve claramente la frecuencia central de transmisión. Se realizaron 4 medidas a distancias desde 2.5 metros hasta 7.5 metros de la antena con el objetivo de verificar la atenuación que sufre la señal recibida en la antena.

Las medidas se realizan en relativo comparando la diferencia de atenuación entre la medida a 2,5 metros de la antena con el resto de las obtenidas para distancias mayores a 2,5 metros. Se utilizará el modelo de propagación *indoor Log-Normal Shadowing Path Loss Model*(UIT-R P.1238-9, 2017) para el cálculo de la atenuación según la ecuación (1).

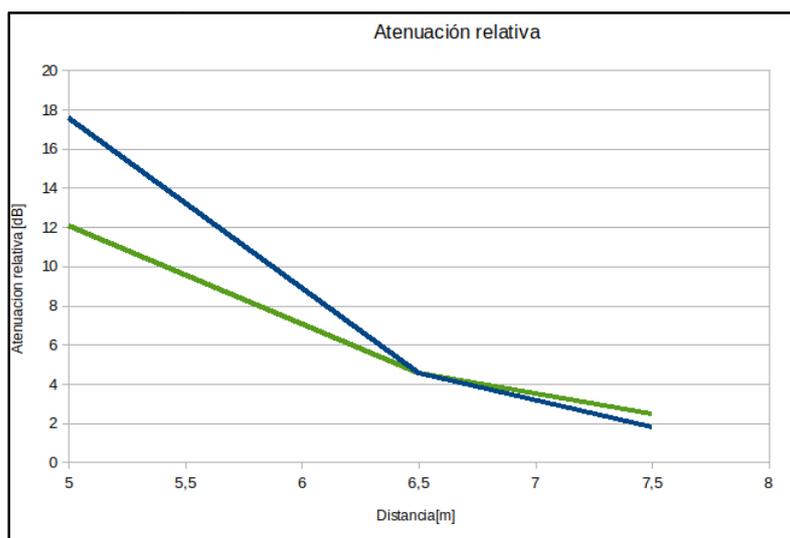
$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d/d_0) \tag{1}$$

Siendo d la distancia a medir, d_0 la distancia de referencia a la antena, que en este caso se tomará como 2,5 metros (primera medida) y n un parámetro que varía entre 1,6 y 2 según la bibliografía y que se tomará en 2 por ajustarse mejor a los datos medidos.

TABLA I. Resultados de las mediciones y su comparación con los modelos teóricos.

Distancia [m]	Frecuencia [Mhz]	Potencia recibida [dbm]	Atenuación Relativa teórica [db]	Atenuación relativa medida [db]
2,5	433,85	-36,83	-	-
5	433,88	-54,39	12,04	17,56
6,5	433,88	-58,96	4,56	4,57
7,5	433,88	-60,75	2,48	1,79

En la figura 8 pueden observarse los resultados de la medición: en color azul las mediciones, respecto de la curva de color verde correspondiente al modelo teórico.

**FIGURA 8.** Medición realizada curva azul y su comparación con el modelo teórico curva verde.

VI. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es llenar una carencia en el estudio y sobre todo la práctica de la propagación de las señales electromagnéticas. Como conclusiones generales de este trabajo puede decirse que el instrumental propuesto para el desarrollo de experiencias de laboratorio vinculadas a la propagación de las señales antes citadas permite la implementación de experimentos de laboratorio para el área de física básicas en electromagnetismo, de una manera accesible para los estudiantes, que pueden verificar así los conceptos dados en la teoría.

Este instrumental propuesto hace uso de los últimos avances en radios definidas por *software* que permiten además una gran flexibilidad a la hora de crear nuevos laboratorios, dado que se dispone de la posibilidad de poder definir los bloques del receptor SDR utilizando el *software* libre GNU-RADIO. Esto le da más flexibilidad al sistema propuesto.

Se realizó además un simple experimento como ejemplo, cuyo objetivo es medir la atenuación por propagación del espacio libre de una señal electromagnética en interiores, comparando los resultados con un modelo teórico, mostrando una aceptable concordancia con los valores esperados, teniendo en cuenta que el dispositivo emisor utilizado es de muy baja calidad (emisor de una alarma de auto). Este resultado obtenido muestra el potencial de esta tecnología para realizar experiencias prácticas de laboratorio.

Como trabajos futuros se pretende repetir la experiencia realizada midiendo la atenuación por propagación utilizando un emisor de más calidad que permita medir de forma más confiable la potencia relativa recibida. Este emisor puede ser un circuito oscilador a transistor con cristal de cuarzo, por ejemplo.

Se pretende incorporar nuevos laboratorios como por ejemplo medición de atenuación en materiales dieléctricos, estudiar la jaula de Faraday desde un punto de vista de señales electromagnéticas por mencionar solamente algunas posibilidades.

Otra gran ventaja es la posibilidad de que el propio alumno pueda adquirir este instrumental dado su bajo costo y poder realizar prácticas en su propia casa que le permitirán reforzar conocimientos y ampliar lo visto en clase.

REFERENCIAS

UIT-R P.1238-9. 2017. *Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz*.<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-9-201706-I/es> Visitado el 3 de junio 2019.

González, E., Zerbini, C., Riva, G., Rosso, D., Suarez, F. y Guanuco, L. (2016), *SDR con GNU-Radio: de la teoría a la aplicación*. Visitado el 2 de junio de 2019:
https://www.researchgate.net/publication/315044183_SDR_con_GNU_Radio_de_la_teor%C3%ADa_a_la_aplicacion

Groshong R., y Ruscak, S. (1991). Exploit digital advantages in an SSB receiver, *Electronic Design*, 39.

Harris, F. J.y Lowdermilk, R. (2010). *Software defined radio: Part 22 in a series of tutorials on instrumentation and measurement*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5399214> Visitado el 5 de junio de 2019.

Machado Fernández, J. R. (2014). *Software Defined Radio: Basic Principles and Applications*.<http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v24n38/v24n38a07.pdf> Visitado el 5 de junio de 2019.

Rtl-sdr. (2019). *Software defined radio with RTLSDR*. <https://www.rtl-sdr.com/> Visitado el 3 de junio 2019.

ANEXO

A continuación, se observa el script en Python 2.7.11 programado para medir el valor promedio de la señal recibida y desarrollar las experiencias detalladas anteriormente, de medición de la atenuación de propagación:

```

from __future__ import division
from __future__ import print_function
from rtlsdr import *
from numpy import *
defmain():

#@limit_calls(100)
def test_callback(samples, rtlsdr_obj):
print('Nivel de Salida (dB):', (10*log10(var(samples))))
if 10*log10(var(samples)) < -45.3:
print('El transmisor esta apagado')
sdr.close()
print('Cerrando el Programa, el transmisor se encuentra apagado')
else:
print('Transmisor emitiendo')

sdr = RtlSdr()

print('Script para testeo')
sdr.rs = 2.4e6
sdr.fc = 433e6
sdr.gain = 10
print('Frec central %0.6f MHz' % (sdr.fc/1e6))
print('ganancia: %d dB' % sdr.gain)
sdr.read_samples_async(test_callback, 256*1024)

if __name__ == '__main__':
main()

```

GLOSARIO

- (1) **USB-DVB-T:** Es un dispositivo receptor Mini Digital TV, perteneciente al estándar DVB-T de Televisión Digital terrestre.
- (2) **Analizadores de espectro:** instrumento que permiten medir señales en el espacio de la frecuencia, permitiendo detectar las componentes fundamentales que la componen.
- (3) **Analizadores de redes:** instrumento electrónico que permite caracterizar en frecuencia las propiedades eléctricas de componentes y materiales. Se utilizan generalmente en alta frecuencia.
- (4) **DSP:** Acrónimo de “*digital signal processing*” son procesadores que realizan cálculos matemáticos a alta velocidad.
- (5) **Banda base:** se refiere al ancho de banda que contiene la información útil de una señal. Esta información luego se demodula y es recuperada en el dispositivo receptor.
- (6) **Demodulador:** dispositivo capaz de recuperar la información útil contenida en una señal. Por ejemplo, audio, video o información digital por citar solo algún caso.
- (7) **LNA:** acrónimo de “*low noise amplifier*”, es un dispositivo electrónico que permite amplificar una señal con muy bajo ruido eléctrico asociado en comparación a la señal que se está obteniendo. Se utilizan a la entrada de una antena receptora por ejemplo para elevar la señal recibida y hacer manejable la misma.
- (8) **Conversores ADC y DAC:** son dispositivos que permiten transformar una señal del mundo real (Ej.: la señal proveniente de un micrófono) a información binaria que pueda ser interpretada por una computadora en el caso de los dispositivos ADC, y recuperada nuevamente en el caso de los conversores tipo DAC.
- (9) **Oscilador local:** Los dispositivos receptores de radio frecuencia generalmente disponen de un circuito interno llamado “oscilador local” que permite generar un patrón de referencia interno que es usado por el receptor para recuperar la información en banda base de la señal original

recibida por una antena.

(10) **Muestras I/Q:** Es una forma de enviar la información de una señal luego de su desmodulación. Se la denomina también señales en fase y cuadratura.

(11) **RTLSDR:** nombre de la familia de dispositivos de radio manejados por *software*, basados en receptores de televisión digital terrestre

Conceptos básicos:

-Ancho de banda: En un receptor de radio se refiere al rango de frecuencias filtradas por el receptor

-Mezclador: Dispositivo electrónico que permite trasladar el espectro de una señal en alta frecuencia a otra frecuencia distinta que depende del oscilador local elegido. Generalmente el objetivo es trasladar el espectro de una señal de alta frecuencia a banda base para luego demodularla y obtener la información útil.