

DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA INSPECCIÓN DE BALIZAS ACTIVAS EN AMBIENTE FERROVIARIO METROPOLITANO

ANDRÉS F. SOTO P.

Universidad Tecnológica Metropolitana
Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, Mención Automática, USACH
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Av. José Pedro Alessandri 1242, Ñuñoa. Santiago, Chile
e-mail: andres.soto@utem.cl

PATRICIO OLAVARRIETA S.

Ingeniero Civil Electricista, Universidad Tecnológica Metropolitana
U de Ch., Master Dpl U. Jaume I Castellón España
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Av. José Pedro Alessandri 1242, Ñuñoa, Santiago de Chile
e-mail: polavarr@utem.cl

LUCIO CAÑETE A.

Universidad de Santiago de Chile
Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Mención Automática
Departamento de Tecnologías Industriales
Avenida Ecuador 3769, Estación Central, Santiago de Chile
e-mail: lucio.canete@usach.cl

CARLOS ÁLVAREZ G.

Universidad de Santiago de Chile
Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, Mención Automática
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Av. Ecuador 3769, Estación Central, Santiago de Chile
e-mail: carlos.alvarez@technologies.cl

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo e implementación de un dispositivo para inspección de balizas activas, de modo que en el ambiente ferroviario metropolitano se simulen pruebas de norma en laboratorio. Para ello se desarrolla un hardware utilizando como base la plataforma Arduino - Duemilanove -, una plataforma de hardware libre, basada en una placa de entradas y salidas que permite ejecutar programas desarrollados en lenguaje Processing/Wiring. Este dispositivo cuenta con una antena loop calculada a la medida de los parámetros de la baliza activa, haciendo uso de la teoría clásica de propagación de ondas electromagnéticas y antenas

Palabras Clave: Microcontroladores, Antenas, Filtros, Propagación, ATP, ATC, Trenes Metropolitanos.

ABSTRACT

The aims at this work are the development and built of a device for active beacons testing, joint it can simulate the laboratory tests, in the metropolitan railway environment. To do this it is developed a hardware platform based on using Arduino - Duemilanove -, an open hardware platform, it is one base plate with input and outputs connecting, allowing to run programs in Processing / Wiring language. This device has a loop antenna designed up for the operating parameters for active beacons, using the classical theory of electromagnetic wave propagation and antenna.

Keywords: Microcontrollers, Antennas, Filters, Propagation, ATP, ATC and Subways.

1 INTRODUCCIÓN

La circulación de Trenes Metropolitanos o Metros como se conoce este tipo de trenes ligeros, debe realizarse de un modo seguro evitando en todo momento situaciones de peligro y, en caso necesario, deteniéndolo con antelación suficiente para evitar choques por alcances, descarrilamientos o hasta que el peligro haya sido eliminado [1].

Para conseguir este objetivo es necesario, tener un ambiente de seguridad bajo especificación y conocer en todo momento su posición en la vía con una precisión dada y, en los sistemas modernos, su sentido de marcha y su velocidad. Con esos datos se establecen sus itinerarios de la forma segura definida y se controlará su circulación evitando colisiones. Los sistemas clásicos de control en ambiente ferroviario se realizan fundamentalmente con semáforos, mientras que en los trenes de alta velocidad se aporta información directamente al tren para que el conductor pueda leer los datos en cabina y los sistemas automáticos puedan actuar en caso necesario [2].

En el corazón del sistema se encuentra un elemento denominado enclavamiento que asume la responsabilidad de autorizar el movimiento de los trenes y supervisar su desplazamiento de modo que, en todo momento, se mantenga una situación segura y se eviten colisiones por alcances [3].

Una variedad de técnicas que incluyen protección, supervisión, operación y comunicación que regulan el movimiento de un tren [4], se conoce como sistemas de Control y Protección de Trenes Automáticos, ATC (Automatic Train Control). Asimismo existe el sistema ATP (Automatic Train Protection) que es un sistema de seguridad que acciona el freno de emergencia de un tren o inhibe ciertas funciones cuando no se cumplen algunas condiciones de seguridad [5]. Ambas técnicas, permiten la operación segura de trenes, así como la automatización y la optimización de su operación.

La protección de los trenes se realiza a través de las siguientes acciones:

- Previendo que el tren salte alguna señal en rojo.
- Controlando la velocidad del tren.
- Avisando con suficiente antelación al conductor de situaciones de peligro por medio de una interfaz hombre máquina.
- Activando los frenos de emergencia en caso de peligro.

Para realizar estas funciones, el sistema de Control de Trenes utiliza un equipamiento técnico en la vía para transmitir información al tren (imanes, balizas, circuitos de vía, etc.). Así también existe un equipamiento técnico embarcado que lee la información transmitida desde la vía, procesa los datos, proporciona información al maquinista y, en el caso de los sistemas automáticos, puede llegar a ordenar el frenado del tren en función de las condiciones del mismo y las órdenes recibidas [6]. En la Figura 1 se pueden ver estas funciones, en el cual ante un evento de peligro, el sistema genera una alarma que desencadena un frenado de emergencia o FU, para detener el tren antes del punto declarado a proteger.

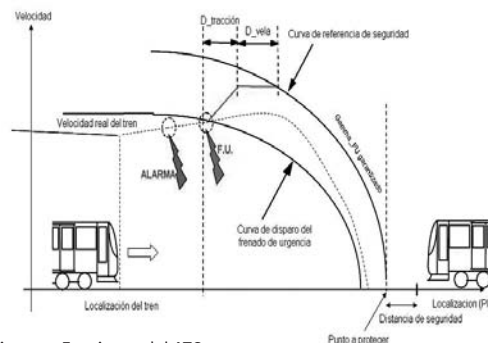


Figura 1: Funciones del ATC.

El componente del sistema en el cual nos centraremos, es un equipo de vía llamado baliza [6]. Las balizas son elementos que se instalan en el eje de la vía entre los dos rieles y funcionan como antena activa, ver Figura 2. Están diseñadas y construidas para soportar las condiciones ambientales extremas que se dan a la intemperie (grandes variaciones de temperatura, humedad, etc.) sin necesitar mantenimiento [7]. Permiten la transmisión discontinua de datos (cuando un tren las activa al pasar por encima de ellas) por medio de un tapiz codi-

ficado con determinadas frecuencias. Además permiten transmisión de datos fiable hasta velocidades del tren de 500 [Km/h].

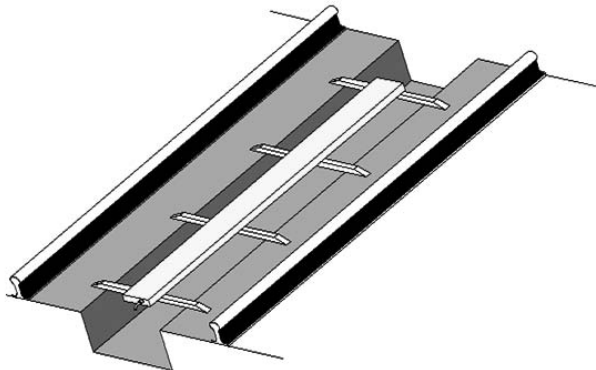


Figura 2: Vista superior de una Baliza Activa.

La totalidad de las plataformas de control de transporte ferroviario metropolitano instaladas en el país son importadas, lo cual crea dependencia de laboratorios especializados y uso de instrumentación costosa en terreno.

Debido a lo anterior nace la necesidad de contar con desarrollos de campo que permitan hacer inspecciones útiles al hardware en terreno, teniendo las características específicas siguientes:

- Portátil, peso menor de 500 [gr].
- De fácil manipulación.
- Orientado a ambiente ferroviario.
- Limitado a detección de frecuencias de 90, 110 y 123.75 [Khz] con un error de 0.3% a una altura máxima de 25 [cm] con un error de 3 [cm].

2 DISEÑO

2.1 DISEÑO TEÓRICO

Para inspección de balizas activas el diseño está obligado a cumplir con la siguiente restricción: Detección e interpretación de la baliza activa, que se encuentra sellada herméticamente e instalada en terreno, la cual transmite un código propietario, en frecuencias definidas.

Con las especificaciones descritas, conceptualmente se necesita un captador de la frecuencia radiante de la baliza para lo cual se escoge una antena de látigo y una plataforma de proceso de la señal captada, además de periféricos que informen del resultado de la inspección. El diseño conceptual se puede ver en la figura 3.

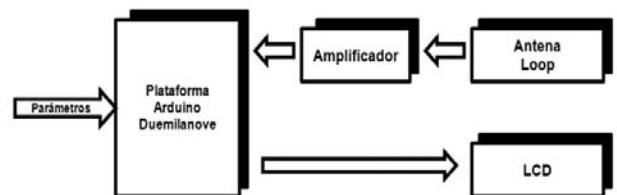


Figura 3: Diseño conceptual de plataforma.

Para su desarrollo se seleccionó una plataforma Arduino - Duemilanove – alimentada con una batería portátil de 9 volt (ver Figura 4) y una antena loop pasiva [9] con núcleo de ferrita (ver Figura 5), sintonizada al ancho de banda específico requerido [10]. Respecto a la plataforma seleccionada, ella presenta ventajas sobre otras plataformas debido a que tiene un puerto USB que conectado a un notebook permite una fácil programación en terreno. Además de entradas que permiten ejecutar programas desarrollados en lenguaje Processing /Wiring [8].

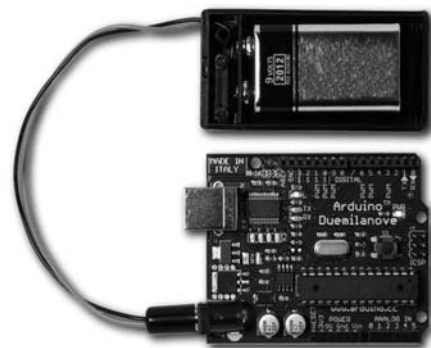


Figura 4: Plataforma Arduino Duemilanove



Figura 5: Antena Loop con núcleo de ferrita

- ▶ ANDRÉS SOTO P.
- ▶ PATRICIO OLAVARRIETA S.
- ▶ LUCIO CAÑETE A.
- ▶ CARLOS ÁLVAREZ G.

Es conocido que la ganancia de la antena seleccionada es pobre, lo que sugiere levantar los niveles digitales de la señal captada y de paso obtener un adecuado funcionamiento y detección por parte del Arduino. Se incorpora, entonces, una etapa de amplificación entre la antena y la plataforma, asegurando el procesamiento de la información y su visualización en la unidad LCD, Figura 3.

En la Figura 6, se muestra el montaje del hardware antes descrito en forma conceptual, en Figura 3. Para ello se ocupó Fritzing, un software libre que permite la creación de Diseños Electrónicos a partir del uso de protoboard como unidad básica de montaje. De esta forma se obtiene una mejor visión del diseño que se busca implementar antes de pasar a la etapa de diseño de placa electrónica o PCB.

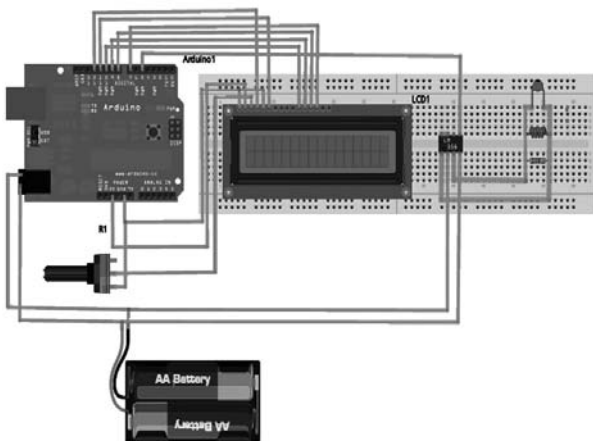


Figura 6: Prototipo de laboratorio o Vista de Protoboard.

2.2 CÁLCULO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Se diseñó una antena loop con núcleo de ferrita, resonante a la frecuencia de 107 [KHz] y que permite atrapar frecuencias de 90 [KHz], 110 [KHz] y 123.75 [KHz], cada una de estas frecuencias se captan con un filtro atrapa banda, centrado en la frecuencia y de 500 [Hz] de ancho, programado en la plataforma Arduino.

La inductancia de resonancia del circuito tanque [11], para una frecuencia de 107 [KHz] o lo más próxima a

ella, se calcula mediante la ecuación (1) de resonancia del tanque, Figura 7.

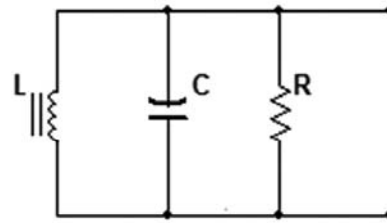


Figura 7: Tanque Resonante.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Donde:

f: frecuencia de resonancia del tanque, en [Hz]

L: inductancia del circuito tanque en [H].

C: capacitancia del circuito tanque en [F].

Despejando la inductancia, el valor buscado es aproximadamente:

$$L \approx 1.474[mH]$$

Con el valor identificado del inductor que se necesita, se procede a su diseño.

Se sabe que el alambre enrollado alrededor de la ferrita tiene una inductancia L_{loop} [12] que se define mediante:

$$L_{loop} \approx \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

Donde:

L_{loop} : inductancia del cableado, en [H].

μ_0 : permeabilidad del vacío, constante de $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

μ_r : permeabilidad relativa (cantidad sin dimensiones, es propia del medio).

N: número de vueltas.

A: área de cada espira, en [m²].

l: longitud de la bobina, en [m].

Considerando tamaño y necesidades del diseño se seleccionaron los siguientes valores:

N: 150.
 Diámetro de una espira: 1.6 [cm].
 Longitud de la bobina: 3.8 [cm].
 μ_r : 10, valor más usado para ferritas en éste tipo de prestaciones.

Calibre AWG 30, de 0.2546 [mm] de diámetro.

Aplicando (3), se obtiene:

$$L_{loop} \approx 1.496[mH]$$

Con esta inductancia la frecuencia de resonancia queda ubicada en 106.245 [KHz] a 755 [Hz] de diferencia bajo el valor especificado.

Por otro lado, se desea asegurar un ancho de banda de 35 [KHz], para asegurar la captación de las frecuencias alejadas del centro.

Se toma en consideración que el ancho de banda, frecuencia de resonancia y factor de calidad del circuito RLC paralelo están relacionadas entre sí por la ecuación 5:

$$BW = \frac{f}{Q} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Donde:

BW: ancho de banda del circuito RLC paralelo, en [Hz]

Q: factor de calidad del circuito RLC paralelo, sin dimensiones.

R: resistencia en [Ω].

C: capacitancia en [F].

Se tiene una frecuencia de resonancia de 107 [KHz] y un ancho de banda mínimo de 35 [KHz], despejando la ecuación anterior se tiene la siguiente expresión, ver ecuación (5):

$$Q = \frac{f}{BW}$$

Dando un $Q \approx 3.14$ (Máximo)

Despejando la variable R de la ecuación 5 se obtiene:

$$R = \frac{Q}{2\pi fC}$$

Cuyo valor es $R \approx 3113[\Omega]$ (máximo)

Si se normaliza este valor a $3[K\Omega]$, el da un ancho de banda teórico de 35368 [Hz] y un factor de calidad $Q \approx 3.03$

Adicionalmente se consideró resistencias y reactancias de todos los elementos que componen e influyen en el rendimiento de la antena [13][14], por lo tanto se procederá a calcular los parámetros concentrados relevantes del modelo eléctrico de una antena loop, ver Figura 8:

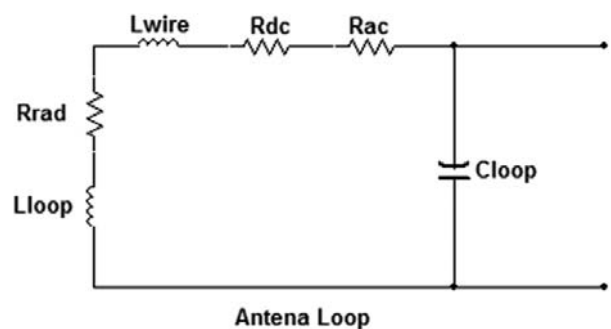


Figura 8: Modelo Eléctrico de Antena Loop.

2.1.1 RESISTENCIA DE RADIACIÓN RRAD

La resistencia a la radiación corresponde a la carga equivalente de la antena durante la transformación de la energía electromagnética en energía eléctrica al recibir y viceversa. Ésta resistencia es virtual, por consiguiente, no genera ruido térmico de acuerdo a la ecuación de Johnson-Nyquist.

- ▶ ANDRÉS SOTO P.
- ▶ PATRICIO OLAVARRIETA S.
- ▶ LUCIO CAÑETE A.
- ▶ CARLOS ÁLVAREZ G.

$$R_{rad} = Z_0 \frac{2}{3} \pi \left(\frac{h_e}{\lambda} \right)^2 = Z_0 \frac{8}{3} \pi^3 \left(\frac{N \mu_r A}{\lambda^2} \right)^2$$

Donde:

R_{rad} : resistencia de radiación, en $[\Omega]$.

Z_0 : impedancia de espacio libre (377 $[\Omega]$)

μ_r : coeficiente de permeabilidad del núcleo.

N : número de vueltas.

A : área de cada vuelta, en $[m^2]$

λ : longitud de onda, en $[m]$.

c : velocidad de la luz en el vacío.

Si:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \mu_0 c = 4\pi 10^{-7} c$$

La ecuación 9, al ser relacionada con la ecuación 10 da origen la ecuación 11:

$$R_{rad} = \frac{32\pi^4 10^{-7}}{3c^3} (N \mu_r A)^2 f^4 = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3c^3} (N \mu_r A)^2 \omega^4$$

Dando como resultado:

$$R_{rad} = 45.88 [p\Omega]$$

2.1.2. Inductancia del alambre L_{wire}

El alambre de la antena loop, en sí tiene una inductancia. Un alambre de longitud $\pi w N$ tiene una inductancia que se define mediante:

$$L_{wire} = \frac{\mu_0 (\pi w N)}{2\pi} \left(2.303 \cdot \log \left(\frac{4(\pi w N)}{d} \right) - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \left(\frac{d}{2(\pi w N)} \right) \right) \quad (13)$$

Donde:

L_{wire} : inductancia de alambre, en $[H]$.

N : es el número de vueltas.

w : es el diámetro de la espira, en $[m]$.

d : es el diámetro del alambre, en $[m]$.

Donde:

L_{wire} : inductancia de alambre, en $[H]$.

N : es el número de vueltas.

w : es el diámetro de la espira, en $[m]$.

d : es el diámetro del alambre, en $[m]$.

$$L_{wire} = 1.582 [\mu H] \quad (14)$$

2.1.3 RESISTENCIA DE ALAMBRE R_{dc}

El cable eléctrico tiene una resistencia que es función de su longitud y diámetro. La resistencia de un alambre está dada por la ecuación 15:

$$R_{dc} = \frac{(\pi w N) \rho}{\pi d^2 / 4} \quad (15)$$

Donde:

R_{dc} : resistencia de alambre, en $[\Omega]$.

N , número de vueltas.

w , diámetro de una espira en $[m]$.

d , diámetro del alambre en $[m]$.

ρ , resistividad del cobre, 16.78 $[n\Omega \cdot m]$.

$$R_{dc} = 2.48 [\Omega] \quad (16)$$

2.1.4 EFECTO SKIN Y RAC

La resistencia de proximidad, R_{ac} es una componente en AC que se agrega al cálculo de la resistencia DC en un alambre, derivada del hecho que la corriente alterna de los alambres vecinos es interfiere magnéticamente la conducción del alambre en cuestión. El resultado se conoce como un efecto de proximidad en las cargas cercanas a la superficie de los alambres y es importante a frecuencias mayores que las usadas en este trabajo.

El que sí es importante a estas frecuencias, es el efecto Skin, que es propio del mismo cable, es decir es producido por el propio campo magnético que produce el alambre; este campo por estar en el mismo conductor

es más intenso que el que enlazan los alambres vecinos y explica porqué es importante la resistencia (Skin) que produce. La resistencia del efecto Skin se puede calcular mediante la ecuación 17:

$$R_{ac} = \frac{\pi w N}{\pi d} \sqrt{\pi \mu_0 f \rho} \quad (17)$$

Donde:

- Rac: es la resistencia efecto Skin, en [Ω].
- N: es el número de vueltas.
- w: es el diámetro de una espira, en [m].
- d: es el diámetro del hilo, en [m].
- μ0: es la permeabilidad del espacio libre (4π10-7 [H/m])
- f: es la frecuencia, en [Hz].
- ρ: es la resistividad del cobre, 16.78 [nΩ • m].

$$R_{ac} \approx 794[m\Omega] \quad (18)$$

2.1.5 CAPACITANCIA DISTRIBUIDA CLOOP

La capacitancia distribuida está dada en forma experimental por la ecuación 19:

$$C_{loop} \approx 3.9685 * 10^{-13} \sqrt[3]{\frac{(400w)^4}{\pi}} \frac{1}{100l} \quad (19)$$

Donde:

Cloop, capacitancia distribuida en una espira circular, en [F].

- w, diámetro de bobina, en [m].
- L, longitud de la bobina, en [m].

$$C_{loop} \approx 0.656[pF] \quad (17)$$

3 HERRAMIENTA SOFTWARE.

Una vez diseñado el circuito receptor, se desarrolla el programa que se encarga de detectar, filtrar y visualizar las frecuencias buscadas.

Para obtenerlas, se ocupan de la plataforma Arduino los contadores y las salidas digitales, junto con el puerto USB para una visualización por consola en una estación de ingeniería portable o fija.

El programa se implementa haciendo uso del entorno de programación propio de Arduino (ver Figura 9) y se transfiere empleando un cable USB. En el caso de la placa no es preciso utilizar una fuente de alimentación externa, ya que el propio cable USB del equipo conectado la proporciona. El voltaje de la fuente puede estar entre 6 y 25 Voltios [15].

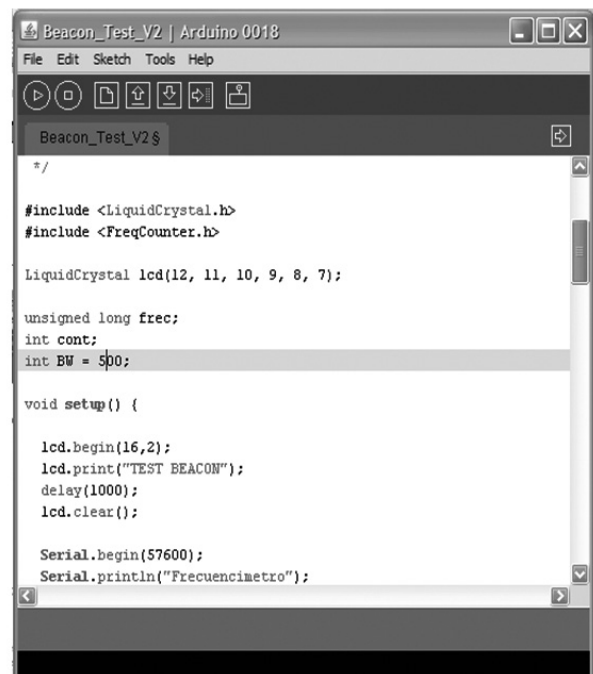


Figura9: Entorno de desarrollo Arduino.

- ▶ ANDRÉS SOTO P.
- ▶ PATRICIO OLAVARRIETA S.
- ▶ LUCIO CAÑETE A.
- ▶ CARLOS ÁLVAREZ G.

La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos etapas: `setup()` y `loop()`. `Setup()` constituye la preparación del programa y `loop()` la ejecución [8].

En la etapa `setup()` se incluye la declaración de variables y trata de la primera función que se ejecuta en el programa.

Esta etapa se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el `pinMode` (p. ej. si un determinado pin digital es de entrada o salida) e inicializar la comunicación serie. La etapa `loop()` incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.).

Teniendo clara la estructura del programa, se procede a definir las entradas y salida de datos, tanto de control como de adquisición y las variables asociadas, como por ejemplo el del ancho de banda, el cual se determina en 500 [Hz] por cada frecuencia a detectar, según especificaciones técnicas dadas.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo que da origen al programa resultante de control de la plataforma.

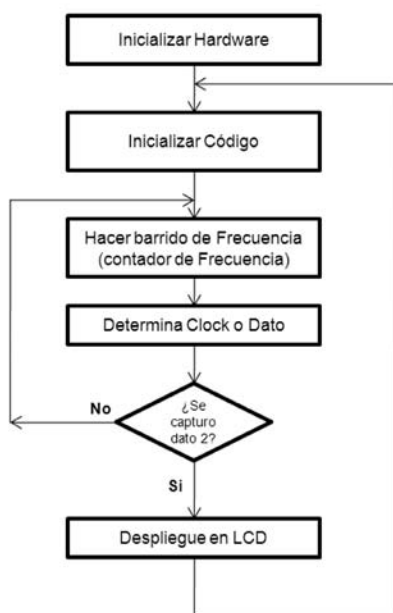


Figura 10: Diagrama de flujo de programación.

4 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

Como primera etapa, la implementación se lleva a cabo en un ambiente controlado, y en el se realizan los procesos siguientes: construcción de la antena, montaje del receptor, conexión de las etapas de recepción, cálculos de pruebas y visualización de resultados.

Se prueba el hardware a especificación, colocando la antena a una distancia cero con respecto a la fuente de emisión. Para llevar a cabo esto se construyó una raqueta de prueba, un lazo de 30 [cm] de diámetro, figura 11, en la cual se hace circular una señal de 10 [Vpp] y offset cero, aplicando una señal sinusoidal mediante un generador de frecuencia Agilent modelo 33220A, Figura 11.

Los resultados fueron los siguientes:

$$L = 1,72 \text{ [mH].}$$

$$f = 123 \text{ [KHz].}$$

$$BW = 38 \text{ [KHz]}$$

Frecuencias de corte inferior = 105 [KHz].
Frecuencias de corte Superior = 143 [KHz].

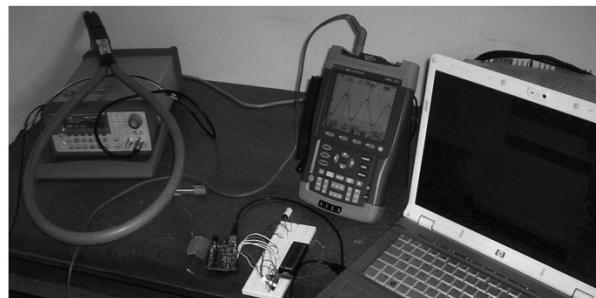


Figura 11: Plataforma Implementada en ambiente controlado.

Luego se procede a hacer un barrido de frecuencia, tomando el caso óptimo, es decir en la frecuencia de resonancia, lo cual nos arrojó un valor de 50 [mV]. Se deduce que la etapa de amplificación debe tener ganancia de 100, para obtener niveles lógicos de entrada al hardware.

El siguiente paso fue de ajustar la etapa de ganancia. Se pudo detectar y visualizar las tres frecuencias buscadas tanto en LCD como en la consola de nuestro programa, Figuras 12 y 13.

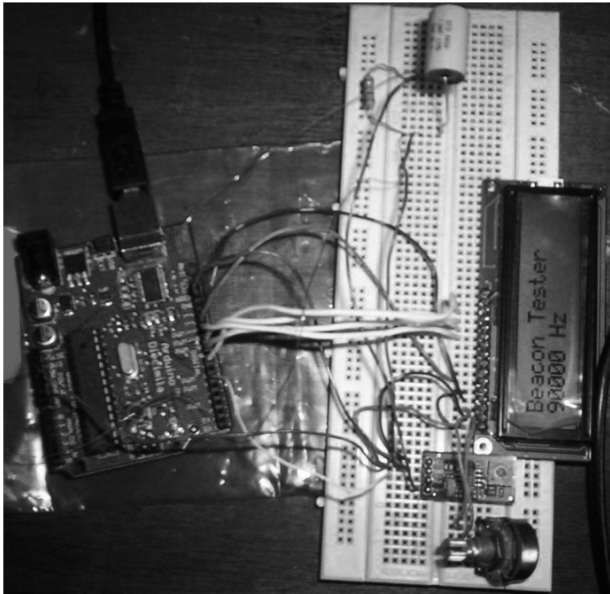


Figura12: Prueba de plataforma en ambiente controlado.

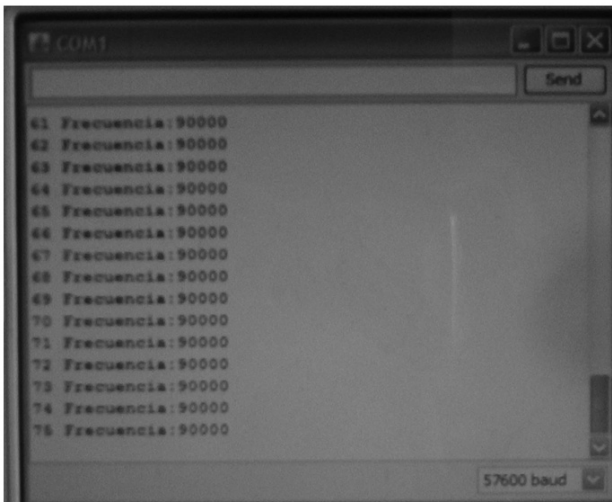


Figura13: Visualización de parámetros mediante consola Processing.

Como última prueba en ambiente controlado, se procedió a encontrar la altura efectiva en la cual aun puede captar las frecuencias buscadas. Se procede a fijar la antena del receptor y se empieza un ascenso de la raqueta de prueba. En el mejor de los casos, las tres frecuencias fueron detectadas a 30 [cm] de distancia de la fuente de emisión, con un error en el contador del orden de no más de 150 [Hz].

En pruebas del diseño en terreno, se energizó una baliza de pruebas con 24 [Vdc], dando un consumo de 160 [mA]. Figura 14.



Figura14: Parámetros de energización de baliza.

La primera prueba de detección, es igualar la altura de 30 [cm] lograda en un ambiente controlado, una vez conseguida, se ve que el error del detector de frecuencia llega a 200 [Hz], pero disminuye casi a cero al disminuir la altura. Figura15.

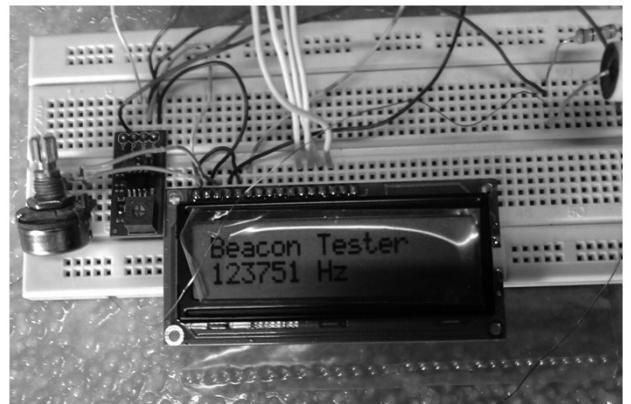


Figura15: Pruebas de plataforma en terreno.

Al hacer un barrido del tapiz general, se logra visualizar los puntos nulos del tapiz y la degradación de las frecuencias. Tabla 1.

- ▶ ANDRÉS SOTO P.
- ▶ PATRICIO OLAVARRIETA S.
- ▶ LUCIO CAÑETE A.
- ▶ CARLOS ÁLVAREZ G.

Con esta prueba se logra igualar los controles de verificación realizados en laboratorio a balizas activas, tanto en altura, detección e interpretación del tapiz.

El ruido y la polución dentro del cual se desarrollan las pruebas de inspección influirán directamente en la altura que debemos poner el dispositivo para no sobrepasar el máximo error de medida aceptado, 0.3% para los tres tipos de frecuencia a una altura máxima de 30 [cm]. Ver Tabla 1.

Reconocimiento de frecuencia Laboratorio [KHz]	Reconocimiento de frecuencia Terreno [KHz]	Altura [cm] Con un error [5mm]	Error [Hz]	Error Max. [Hz]	Estrado Ok / Nok
90	90	0	0	+ 250	Ok
110	110	0	0	+ 250	Ok
123.75	123.75	0	0	+ 250	Ok
90	90.05	15	50	+ 250	Ok
110	110.092	15	92	+ 250	Ok
123.75	123.862	15	112	+ 250	Ok
90	90.2	<30	200	+ 250	Ok
110	110.213	<30	213	+ 250	Ok
123.75	123.955	<30	205	+ 250	Ok
90	90.365	>30	365	+ 250	Nok
110	110.390	>30	390	+ 250	Nok
123.75	124.075	>30	325	+ 250	Nok

Tabla 1: Resultados Laboratorio vs Terreno.

5 CONCLUSIONES

Se implementó y probó con éxito una plataforma de inspección portátil para balizas activas, de un peso de 400gr.

Fue probada en un ambiente ferroviario metropolitano con el protocolo normal de laboratorio.

Se determinó correctamente la altura de detección, frecuencias y puntos nulos de las balizas. Luego fue adecuadamente especificado para las tres funciones siguientes:

La altura máxima de detección confiable fue de 30 [cm] con un error de 0.5 [cm], que es mejor que la especificación 25 [cm] con error 3 [cm].

El error de medida en la frecuencia fue bajo 250 [Hz], dentro del 0.3% y el de la altura de captación sobre la baliza y la detección de puntos nulos es menor que 0.5 [cm]. Tabla 1.

REFERENCIAS

1. C. Braban, G. Yelloz. “Resignalling and Interoperability”, IRSE Technical Convention Singapore, Octubre 2005.
2. J.C Lorenzo, J.I De Santiago. “El sistema ERTMS: El primer Estándar Paneuropeo para Señalización Ferroviaria Orientado a la Interoperabilidad”. Anales de mecánica y electricidad / enero-febrero 2007.
3. F. Montes. “Los sistemas de señalización en el ferrocarril: su evolución. Anales de mecánica y electricidad / enero-febrero 2007.
4. O. Teague, C. Case, “Automatic Train Control in rail rapid transit”. Office of technology assessment, congressional board of United States Congress. May.1976.
5. M. Fukuda, I. Watanabe, Y. Hirao, T. Takashige, N. Tomii and H. Ikeda, “An integrated train control system based on digital ATP”, WCRR’ 97, Proceedings of the World Congress on Railway Research, 1997, Vol. C, pp. 327-334.
6. L. García Tassias. “Telecomunicaciones ferroviarias en las líneas de alta velocidad”. bit 157 JUN.-JUL. 2006.
7. T. Parkinson. “TCRP (Transit Cooperative Research Program) Report: Rail Transit Capacity”. National Academy Press. Washington, D.C. 1996.
8. F. González. “Apuntes de Señalización Ferroviaria”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Madrid 17.03.06.
9. B. Evans. “Arduino Notebook: a beginner’s reference”. Edición Libre (en formato digital). Primera Edición, Agosto 2007.
10. J. Kraus. Lee, “Antennas for all applications”, Tata McGraw-Hill publishing company limited, New Dheli, 1988.
11. M. Wilson, S. Ford. “The ARRL: Handbook for Radio Communications 2009. Editorial Amer Radio Relay League (ARRL). Edición 86, publicada en Diciembre 2008.
12. R. Dorf. “Circuitos Eléctricos: Introducción al Análisis y Diseño”. Editorial Marcombo. Primera Edición. Barcelona, España. 2000.
13. R. Dean Straw. “The ARRL Antenna Book: The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, Transmission Lines and Propagation”. Editorial Amer Radio Relay League (ARRL). Edición 21, publicada en Mayo 2007.
14. C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design”, Wiley-Interscience a John Wiley & Sons INC. Publication, 2005, Third edition.
15. J. Ozer, H. Blemings. “Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware”. Editorial Apress. Primera Edición, Diciembre 2009.