



Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos

Measuring parameters in transmission lines with embedded systems

Angelo Joseph Soto-Vergel ¹, Jorge Enrique Herrera-Rubio ², Darwin Orlando Cardozo-Sarmiento ³

Fecha de Recepción: 11 de septiembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de abril de 2022

Cómo citar: Soto-Vergel, A.J. Herrera-Rubio, J.E. y Cardozo-Sarmiento, D.O. (2022). Medición de parámetros en líneas de transmisión con sistemas embebidos. *Tecnura*, 26(73), 98-114. <https://doi.org/10.14483/22487638.18131>

Resumen

Contexto: Las líneas de transmisión son estructuras construidas de material uniforme, dispuestas como un arreglo de pares de conductores o semiconductores, que guían las ondas electromagnéticas que transportan la energía de radiofrecuencia entre un dispositivo emisor y otro receptor. Su importancia en las comunicaciones radica en el conocimiento de sus parámetros fundamentales, para lo cual se requiere de equipos de medida especializados e instrumentos de laboratorio que proporcionen información para tomar decisiones de importancia en el acople de tecnologías en los sistemas de transmisión de datos.

Objetivo: Explicar el funcionamiento de un sistema de medición de parámetros de líneas de transmisión como propuesta de bajo costo y automatizada para su caracterización, implementado mediante sistemas embebidos.

Metodología: Para ello, se creó e implementó una arquitectura de *hardware* y *software*, con el uso de entradas análogas para medir tanto la atenuación e interrupciones digitales y temporizadas, como el retardo entre las ondas incidente y transmitida. Con estos datos se calculó la impedancia característica, constante de atenuación, constante de fase, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia, mediante ecuaciones experimentales. Se realizaron cuatro experimentos utilizando 305 metros de cable coaxial; se comprobaron los datos obtenidos con los teóricos del fabricante, los cuales se validaron con medidas de equipos de instrumentación electrónica especializados, como el generador de funciones y el osciloscopio digital, con el objetivo de conocer el error de la herramienta diseñada frente a instrumentos avanzados.

¹Ingeniero electrónico, tecnólogo en Análisis y Diseño de Sistemas de Información, especialista en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo de Software, magíster en Educación Matemática. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Norte de Santander, Colombia.

Email: angelojosephsv@ufps.edu.co

²Ingeniero electrónico, especialista en Telecomunicaciones, magíster en Ingeniería Electrónica, doctor en Ciencias. Docente de la Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Email: jherrera@unipamplona.edu.co

³Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Norte de Santander, Colombia.

Email: darwinorlandocs@ufps.edu.co

Resultados: Se construyó un dispositivo que calcula los parámetros básicos de una línea de transmisión con un error entre 3 % y 9 % en las mediciones.

Conclusiones: La herramienta desarrollada entrega resultados cercanos a los valores teóricos y, al compararse con los instrumentos (osciloscopio digital y generador de funciones), mide de forma exacta la impedancia característica; presenta un error porcentual del 3,7 % cuando mide la constante de fase; y registra un error porcentual menor del 9 % cuando calcula constante de atenuación, retardo, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia. Esto determina que el error máximo de las mediciones es 8,98 %, y así se demuestra que el dispositivo desarrollado es adecuado para la medición de los parámetros de las líneas de transmisión.

Financiamiento: Universidad de Pamplona.

Palabras clave: arduino, líneas de transmisión, sistema de medición, sistemas embebidos, telecomunicaciones.

Abstract

Context: Transmission lines are structures constructed of uniform material arranged as an array of conductor or semi-conductor pairs to guide electromagnetic waves carrying radio frequency energy between a transmitting device and a receiving device. Its importance in communications lies in the knowledge of its fundamental parameters, which requires specialised measurement equipment and laboratory instruments to make important decisions on the coupling of technologies in data transmission systems.

Methodology: To do so, a hardware and software architecture is created and implemented using analogue inputs to measure attenuation and digital and timed interruptions to measure the delay between the incident and transmitted waves, whose data are used to calculate characteristic impedance, attenuation constant, phase constant, propagation speed, resistance, conductance, capacitance and inductance, by means of experimental equations. Four experiments are carried out using 305 meters of coaxial cable, checking the data obtained with the manufacturer's theoretical data and validating with measurements of specialised specialized electronic instrumentation equipment, such as the function generator and the digital oscilloscope, with the aim of finding out the error of the proposed tool designed compared to advanced instruments.

Results: As a result, a device is built that calculates the basic parameters of a transmission line with an error between 3 % and 9 % in the measurements.

Conclusions: The developed tool delivers results close to the theoretical values and when compared with electronic measurement instruments (digital oscilloscope and function generator), it measures the characteristic impedance accurately; it presents a percentage error of 3.7 % when measuring the phase constant; and finally, it presents a percentage error of less than 9 % when measuring the attenuation constant, delay, propagation speed, resistance, conductance, capacitance and inductance. This determines that the maximum error of the measurements is 8.98 %, demonstrating that the proposed device developed is suitable for measuring the parameters of transmission lines.

Funding: University of Pamplona.

Keywords: arduino, transmission lines, measurement systems, embedded systems, telecommunications.

Tabla de Contenidos

	Página
Introducción	100
Metodología	102
Creación del sistema	102
Implementación del sistema	102
Pruebas del sistema	105
Resultados	106
Creación e implementación de la arquitectura	106
Pruebas del sistema	108
Conclusiones	111
Referencias	112

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería electrónica, los conductores, o también denominados *líneas de transmisión* (LT), son uno de los principales elementos de los sistemas electrónicos y de telecomunicaciones que tienen la función de transmitir señales entre dispositivos o componentes (Costa *et al.*, 2017). Por tanto, es necesario conocer los parámetros principales de las LT, ya que al realizar diseños de estos sistemas se debe considerar las pérdidas debido a longitud, frecuencia y acoplamientos; los parámetros principales de las LT, que son las constantes de atenuación y de fase; la velocidad de propagación de la onda, la resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; finalmente, la impedancia característica. Estas variables se pueden representar por medio de los parámetros S (dispersión) y T (redes de dos puertos) (Cheng *et al.*, 1997, Hayt *et al.*, 2006, Neri Vela, 1999, Sadiku, 2003, Ulaby, 2017). Aunque existen herramientas para la medición de los parámetros de las LT, estas presentan un gran costo al momento de su compra, cuidado y mantenimiento.

Actualmente, para los investigadores es importante determinar los parámetros de las LT; en este caso, Manfredi *et al.* (2016) usan una técnica de perturbaciones adaptativas para realizar el análisis de las LT no uniformes, desarrollan un algoritmo para resolver las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la línea de una forma estándar.

De igual forma, Jing *et al.* (2018) muestran un método para determinar perfiles de los parámetros de impedancia y conductividad de una LT con pérdidas, utilizan mediciones de pérdidas de retorno y de transmisión de ambos extremos de la LT para proceder con la demostración de los resultados por medio de simulación y de experimentos con varias configuraciones.

En la investigación de [Rabaani et al. \(2019\)](#) se presentan los resultados sobre los coeficientes de transmisión y reflexión en LT no uniformes de alta frecuencia.

Por su parte, [Yin et al. \(2015\)](#) establecen una nueva teoría de perturbación de impedancia basada en el modelo de línea de transmisión agrupada, tanto para las líneas de un solo extremo como para las acopladas, donde la constante de propagación, los parámetros S – relacionados con las ondas de voltaje incidentes y reflejadas–, y los parámetros T –que permiten expresar las relaciones entre las impedancias a partir de los parámetros S–, pueden construirse directamente a partir de un factor de perturbación de impedancia, realizando tres análisis para evaluar la precisión y sensibilidad de la medición mediante la experimentación de resultados.

También, [Liu et al. \(2016\)](#) presentan un método analítico para la LT basado en la teoría de la pequeña reflexión y se puede aplicar al transformador multifrecuencia con un valor de frecuencia arbitrario en un rango determinado, a través de la realización de pruebas de desarrollo de cálculos y simulaciones.

Finalmente, [Chabane et al. \(2017\)](#) plantean una teoría de línea de transmisión mejorada, donde sus ecuaciones constitutivas se derivan directamente de las ecuaciones de Maxwell, sin la restricción del modo electromagnético transversal, conservando al mismo tiempo el formalismo matemático de la teoría clásica de la línea de transmisión, desarrollando ecuaciones que pueden ser fácilmente resueltas por los solucionadores clásicos existentes. Una tendencia futura son las redes inteligentes, como lo analizan [Giral et al. \(2017\)](#), donde se identifican las principales características y la digitalización de las LT, como un factor determinante en el uso de diferentes dispositivos embebidos que se comunican en red y que requieren del estudio de parámetros eléctricos para llegar a la automatización del sistema eléctrico colombiano.

A partir de lo anterior, el grueso de las investigaciones se concentra en determinar analítica y matemáticamente los parámetros de las LT y realizar su comprobación mediante experimentos y simulaciones ([Reynoso et al., 2020](#), [Shlivinski y Hadad, 2018](#)); sin embargo, es necesario desarrollar estudios que diseñen e implementen herramientas y equipos que puedan estimar el diagnóstico y fallas de los parámetros de forma simple y sencilla ([Asprou et al., 2019](#), [Chen et al., 2018](#)). Esta tarea puede ser desarrollada por los sistemas embebidos, que se usan en aplicaciones específicas y permiten obtener un buen rendimiento con sistemas de bajo costo computacional ([Parada et al., 2016](#)) y menos componentes que el uso de computadoras o equipos de propósito general ([Manfredi et al. \(2016\)](#), [Xue et al., 2020](#)).

Por tanto, en esta investigación, se desarrolla una herramienta para la caracterización de una línea de transmisión con sistemas embebidos, la cual representa un aporte importante en el escenario de las ciudades inteligentes y lo concerniente a la constante necesidad de monitorear variables en todos los subsistemas de la ciudad, específicamente en el concepto de redes eléctricas inteligentes. Para ello se crea la arquitectura del sistema a través de la determinación de unos requerimientos mínimos y de la presentación de un diseño funcional de esta; se implementa la arquitectura mediante el *software* necesario para cumplir con las exigencias del análisis requerido, y se prueba el sistema que contraste

los resultados con equipos de medida de laboratorio para inferir conclusiones.

METODOLOGÍA

La validación de la investigación tiene un sentido praxiológico cuando los conceptos se fundamentan en la construcción de las acciones por medio de la experimentación, de acuerdo con la comprobación de Gallego *et al.* (2020), por medio de un modelo guiado para diseñar rutas y metodologías en el abordaje de la formulación y resolución de problemas de ingeniería. En este sentido, la figura 1 ilustra la metodología implementada en sus diferentes fases y etapas, las cuales se definen y desarrollan desde el concepto de sistema embebido, según Ashford-Lee y Arunkumar-Seshia (2017); Noergaard (2005), y Zurawski (2018).



Figura 1. Metodología para el desarrollo del sistema

Fuente: elaboración propia.

Creación del sistema

El propósito de esta fase es tener el diseño de *hardware* y *software* del sistema para la caracterización de una línea de transmisión en sus parámetros fundamentales: constante de atenuación y de fase; resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; velocidad de propagación de la onda e impedancia característica. La tabla 1 muestra las características de interés del sistema embebido seleccionado.

Implementación del sistema

Esta fase tiene como propósito codificar los algoritmos de funcionamiento, que son implementados en la placa de desarrollo Arduino identificada como sistema embebido, para el cálculo de los parámetros en la línea de transmisión y la integración tecnológica del sistema. Además, en esta fase

Tabla 1. Características del sistema embebido: Arduino Pro Mini

Característica	Descripción
Microcontrolador	ATmega 328p
Voltaje operativo	3,3 V
Corriente máxima de salida	150 mA
Pines de entrada/salida digital	14 pines
Pines PWM	6 pines
Pines de entrada analógicos	6 pines
Memoria Flash	32 kB
Memoria SRAM	1 kB
Velocidad de reloj	8 MHz
Dimensiones	18 x 33 mm
Peso	2 gr
Precio	COP \$13.000

Fuente: elaboración propia.

se aplican las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5), (6) y (7), para el cálculo experimental de los parámetros necesarios en la caracterización de la línea de transmisión de la siguiente manera: constante de atenuación, constante de fase, velocidad de propagación de la onda, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por metro; mediante las ecuaciones.

$$\alpha = \frac{20}{l} \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (1)$$

Donde:

α es la constante de atenuación de la línea de transmisión en decibeles por metro (dB/m).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

V_{out} es el voltaje de la onda transmitida en voltios (V).

V_{in} es el voltaje de la onda incidente en voltios (V).

$$\beta = \frac{2\pi \cdot f \cdot r}{l} \quad (2)$$

Donde:

β es la constante de fase de la línea de transmisión en radianes por metro (rad/m).

f es la frecuencia de la onda incidente en *hertz* (Hz).

r es el retardo medido entre las ondas incidente y transmitida en segundos (s).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

$$v_p(c) = \frac{l}{r \cdot c} \quad (3)$$

Donde:

$v_p(c)$ es la velocidad de propagación de la onda en términos de la velocidad de la luz.

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

r es el retardo medido entre la onda incidente y la onda transmitida en segundos (s).

c es la velocidad de la luz en metros por segundo (m/s).

$$R = \frac{Z_{in}}{l} \quad (4)$$

Donde:

R es la resistencia de la línea de transmisión en ohmios por metro (Ω/m).

Z_{in} es la impedancia de entrada de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

l es la longitud de la línea de transmisión en metros (m).

$$G = \frac{1}{R} \quad (5)$$

Donde:

G es la conductancia de la línea de transmisión en Siemens por metro (S/m).

R es la resistencia de la línea de transmisión en ohmios por metro (Ω/m).

$$C = \frac{1}{v_p \cdot Z_0} \quad (6)$$

Donde:

C es la capacitancia de la línea de transmisión en faradios por metro (F/m).

v_p es la velocidad de propagación de la onda en metros por segundo (m/s), $v_p = l/r$.

Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

$$L = \frac{Z_0}{v_p} \quad (7)$$

Donde:

L es la inductancia de la línea de transmisión en henrios por metro (H/m).

Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión en ohmios (Ω).

v_p es la velocidad de propagación de la onda en metros por segundo (m/s), $v_p = l/r$.

Para el cálculo experimental de la impedancia característica se usa un potenciómetro conectado al final de la línea, que se ajusta observando las ondas incidente y reflejada en el osciloscopio hasta

lograr que el coeficiente de reflexión sea cero, condición en la cual se dice que la línea está acoplada y se cumple que la impedancia conectada como carga a la línea de transmisión es la misma que la impedancia característica. Finalmente, se retira el potenciómetro de la línea y se mide con un multímetro su valor.

Pruebas del sistema

Para el desarrollo de las pruebas se realizan cuatro experimentos sobre una línea de transmisión minicoaxial de 305 m de longitud. La tabla 2 relaciona las tecnologías utilizadas en cada experimento, con la finalidad de comparar los resultados del sistema con equipos de laboratorio.

Tabla 2. Experimentos propuestos para el desarrollo y prueba del sistema

Experimento	Generación de PWM	Lectura de señal
1	Generador de funciones SG2120 DDS	Osciloscopio digital ADS1102CML
2	Arduino Pro Mini	Osciloscopio digital ADS1102CML
3	Generador de funciones SG2120 DDS	Arduino Pro Mini
4	Arduino Pro Mini	Arduino Pro Mini

Fuente: elaboración propia.

En términos generales, los experimentos consisten en inyectar un pulso PWM de 100 kHz con un ciclo de trabajo del 10%; esto, debido a que en diferentes pruebas se caracterizó en frecuencia la placa Arduino Pro Mini, y la señal cuadrada de mayor frecuencia que puede leer sin errores es de 100 kHz con un ciclo de trabajo mínimo sin alteraciones del 10%. Estas características de la onda son necesarias para que las ondas incidente, reflejada y transmitida no se superpongan entre sí y sea posible la medición de los flancos de subida y la amplitud de cada una de ellas sin interferencias.

La figura 2 diferencia estas ondas en una visualización desde el osciloscopio digital, además identifica los eventos importantes en el proceso de medición y muestra las ondas después del acople de impedancias para proceder a una correcta toma de datos. La diferencia temporal de ocurrencia de los flancos de subida de las ondas incidente y transmitida determinan el retardo; así mismo, la diferencia de amplitudes refleja la atenuación; afectaciones que se presentan por la propagación de la onda en la línea de transmisión.

Los datos medidos con el sistema embebido son comparados con instrumentos especializados para tener un referente, considerando las especificaciones técnicas determinadas por Lapp ? para el cable coaxial.

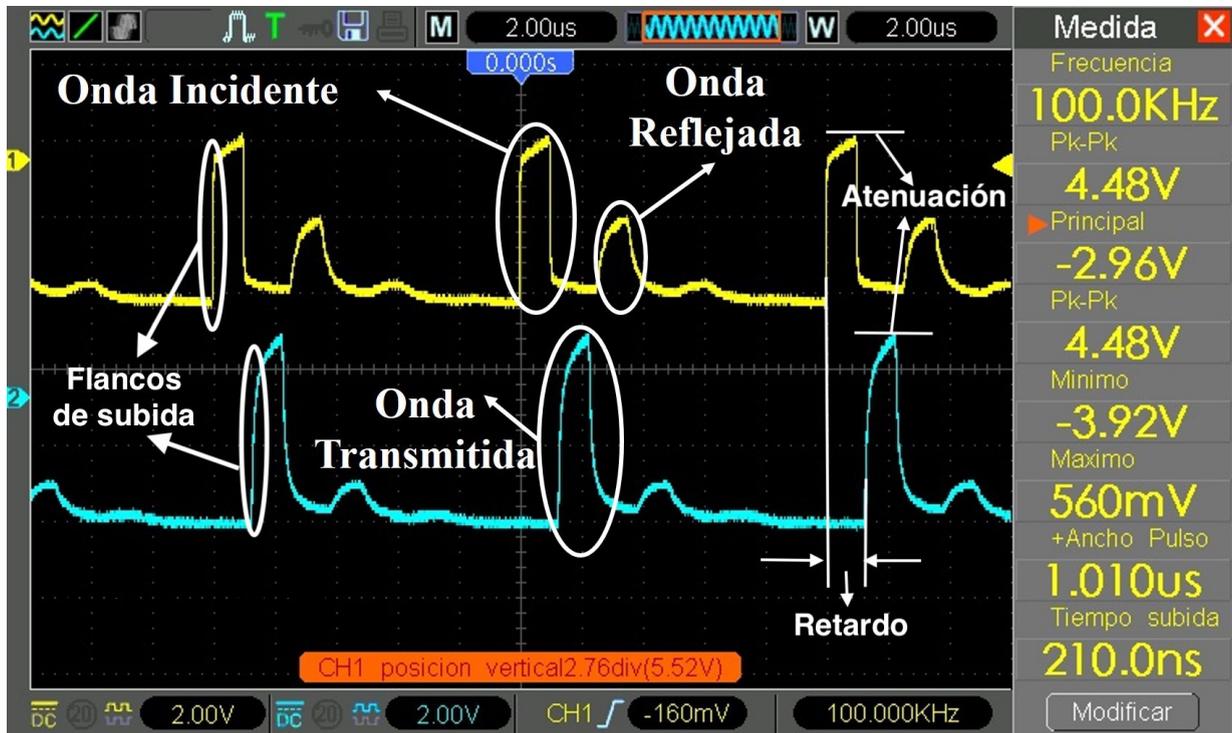


Figura 2. Ondas incidente, reflejada y transmitida, en la línea de transmisión coaxial con identificación de flancos, retardo y atenuación

Nota: tomada experimentalmente con el osciloscopio digital ADS1102CML.

Fuente: tomada experimentalmente con el osciloscopio digital ADS1102CML.

RESULTADOS

Este apartado se estructura con base en la metodología de la figura 1, presenta los resultados del procesamiento de la caracterización de una línea de transmisión en sus parámetros fundamentales y expone su análisis.

Creación e implementación de la arquitectura

La figura 3 muestra la arquitectura del *hardware* desarrollado, en un bosquejo de dos módulos: el generador y el medidor.

El módulo generador es usado para la inyección del pulso PWM con un ciclo de trabajo del 10% a 100 kHz; este cuenta con dos pulsadores para enviar y detener la onda incidente y un acondicionamiento de señal basado en un amplificador TL071 con ganancia de voltaje experimental de 2 V para compensar las pérdidas por atenuación en la línea de transmisión y por el acople de la línea con la tarjeta Arduino, lo que garantiza un nivel de señal en las ondas incidentes y transmitidas mínimo de 3,3 V para una lectura correcta por parte del sistema.

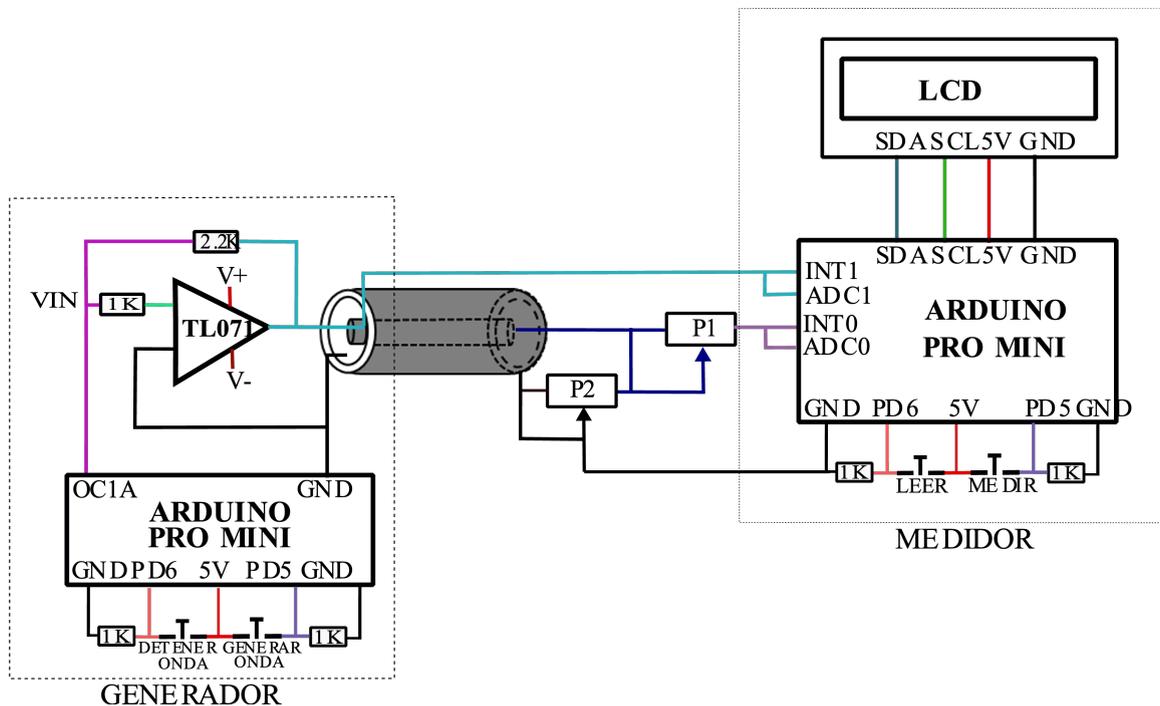


Figura 3. Arquitectura física del sistema para la medición de parámetros fundamentales en una línea de transmisión

Fuente: elaboración propia.

El módulo medidor es usado para la lectura de los datos y el cálculo de los parámetros, también con dos pulsadores, uno para leer las ondas incidente y transmitida y otro para visualizar los parámetros calculados experimentalmente en la pantalla LCD, y se incluyen P1 y P2 que son potenciómetros para una adaptación de impedancias óptima entre el sistema y la línea. Como parte de la realimentación contemplada en la metodología, se incorpora el acople de impedancias para garantizar la máxima transferencia de señal del módulo generador al módulo medidor y el acondicionamiento de señal con el amplificador.

La figura 4 detalla el funcionamiento del módulo generador, el cual hace uso de una interrupción por desbordamiento del *Timer1* para generar el pulso con las características definidas en los requerimientos; para ello hace uso de la librería *TimerOne.h*.

La figura 5 especifica la lógica del módulo medidor encargado de medir, por pines analógicos, el valor medio y, por pines digitales, la diferencia de tiempos entre las ondas incidente y transmitida para calcular la atenuación y el retardo en la línea de transmisión, respectivamente.

El diagrama de flujo del *software* del módulo medidor consta de seis funciones: *void setup()*, *void loop()*, *ISR(TIMER1_OVF_vect)*, *void prepareForInterrupts()*, *void isr2()* y *void isr3()*. La función *void setup()* configura el hardware de las entradas analógicas, digitales y el *Timer1*, e inicia la función *prepareForInterrupts()*. Esta última dispone las banderas que indican el momento en que ocurre un flanco de subida en la onda incidente habilitando la interrupción 0, la cual ejecuta a *isr2()* que almacena la cuen-

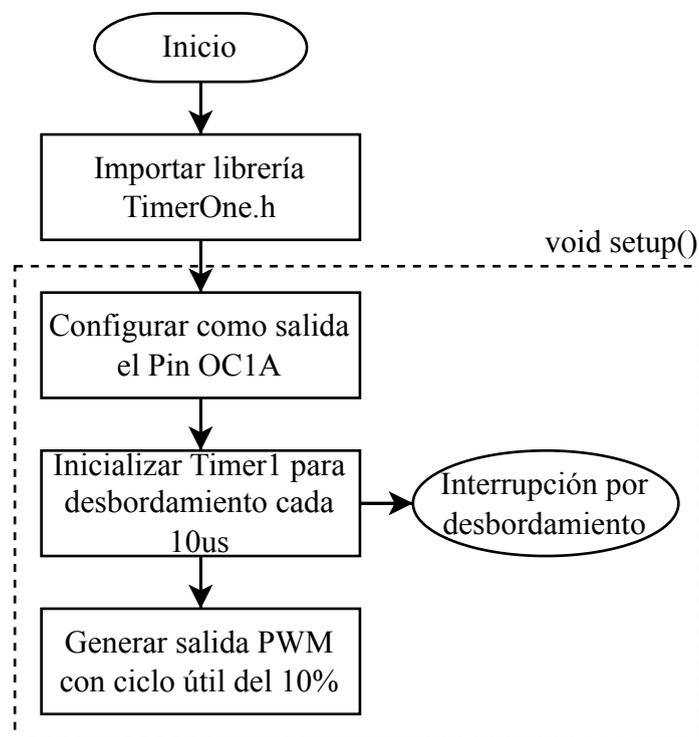


Figura 4. Diagrama de flujo del módulo generador

Fuente: elaboración propia.

ta del *Timer1* en el instante en que ocurre el evento del flanco de subida de la onda incidente, deshabilita la interrupción de ésta y habilita la interrupción de la onda transmitida, ejecutando a *isr3()* que registra la cuenta del *Timer1* en que ocurre el evento del flanco de subida de la onda transmitida deshabilitando la interrupción de esta, y el ciclo vuelve a comenzar. La función *ISR(TIMER1_OVF_vect)* se ejecuta con cada ciclo de reloj del *Timer1*, con una duración teórica de 62.5 ns, y almacena este dato en la variable *overflowCount* para tener una cuenta adecuada del número de ciclos ocurridos y, así, calcular el valor del retardo en una unidad de tiempo.

Pruebas del sistema

La figura 6 muestra la conexión física propuesta de los cuatro experimentos descritos en la tabla 2.

El primer experimento consiste en generar la onda incidente con el generador de funciones y leer los datos experimentales con el osciloscopio digital, mediante el cálculo de los parámetros por observación de forma manual.

El segundo experimento busca generar la onda incidente con la placa de desarrollo Arduino y leer los datos experimentales con el osciloscopio digital, a través del cálculo de los parámetros por observación de forma manual.

El tercer experimento busca generar la onda incidente con el generador de funciones y leer los

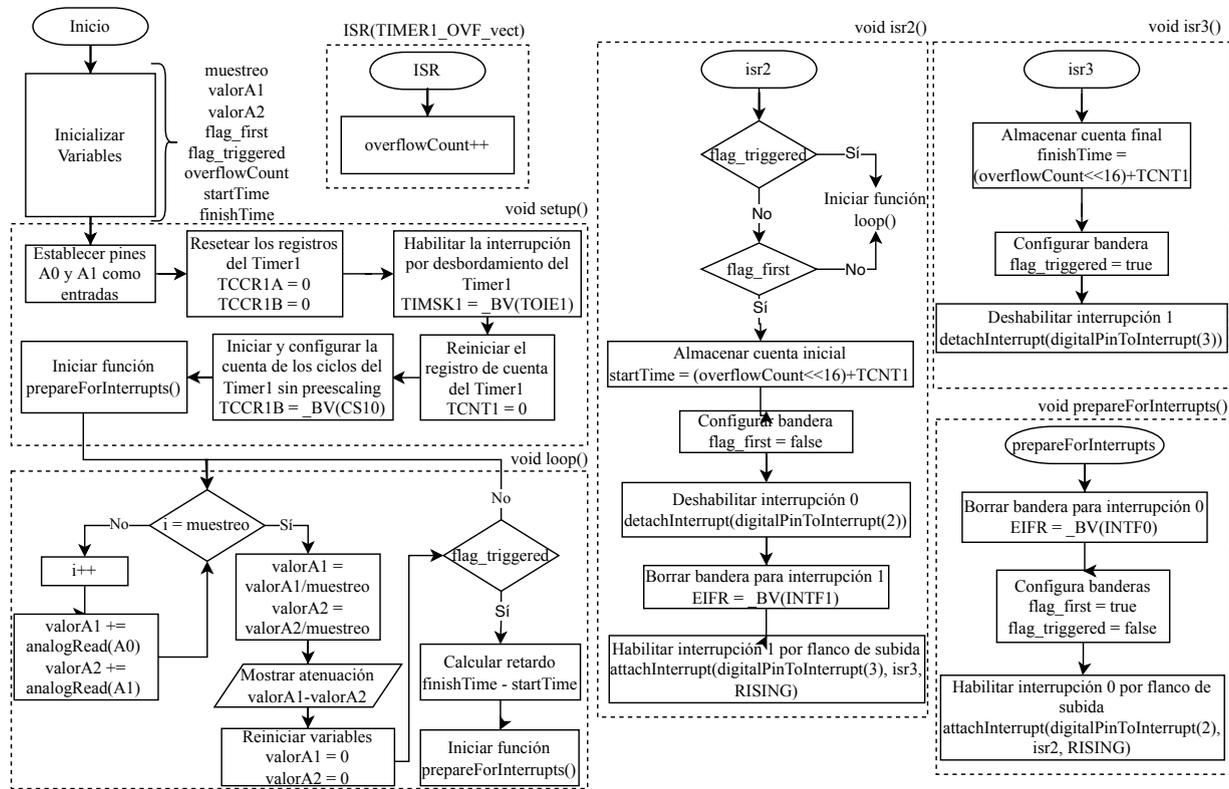


Figura 5. Diagrama de flujo del software para el módulo medidor

Fuente: elaboración propia.

datos experimentales con la placa de desarrollo Arduino, al realizar el cálculo de los parámetros de forma automática.

Finalmente, el cuarto experimento consiste en generar la onda incidente y leer los datos experimentales, con el uso de una placa de desarrollo Arduino. Este último ensayo constituye el sistema de medición de parámetros fundamentales de una línea de transmisión basado en sistemas embebidos, por lo que sus resultados son los de mayor relevancia en este artículo.

En la tabla 3 se presenta una comparación entre los datos de la hoja de especificaciones de la línea, los cálculos teóricos basados en las especificaciones de fabricación de esta y los cálculos experimentales obtenidos en cada experimento; aquí se relaciona el error porcentual absoluto entre los experimentos 1 y 4, dado que representan la comparación objetivo de este trabajo. Los parámetros del cable coaxial utilizado para las pruebas se toman como referentes en cada uno de los experimentos para validar el procedimiento de cálculo propuesto; estos datos fueron tomados de la hoja de especificaciones publicada por la empresa Lapp Tannehill (2019).

Por último, la tabla 4 muestra una comparativa económica del sistema construido frente a los equipos de laboratorio tradicionales utilizados en la validación de las mediciones experimentales.

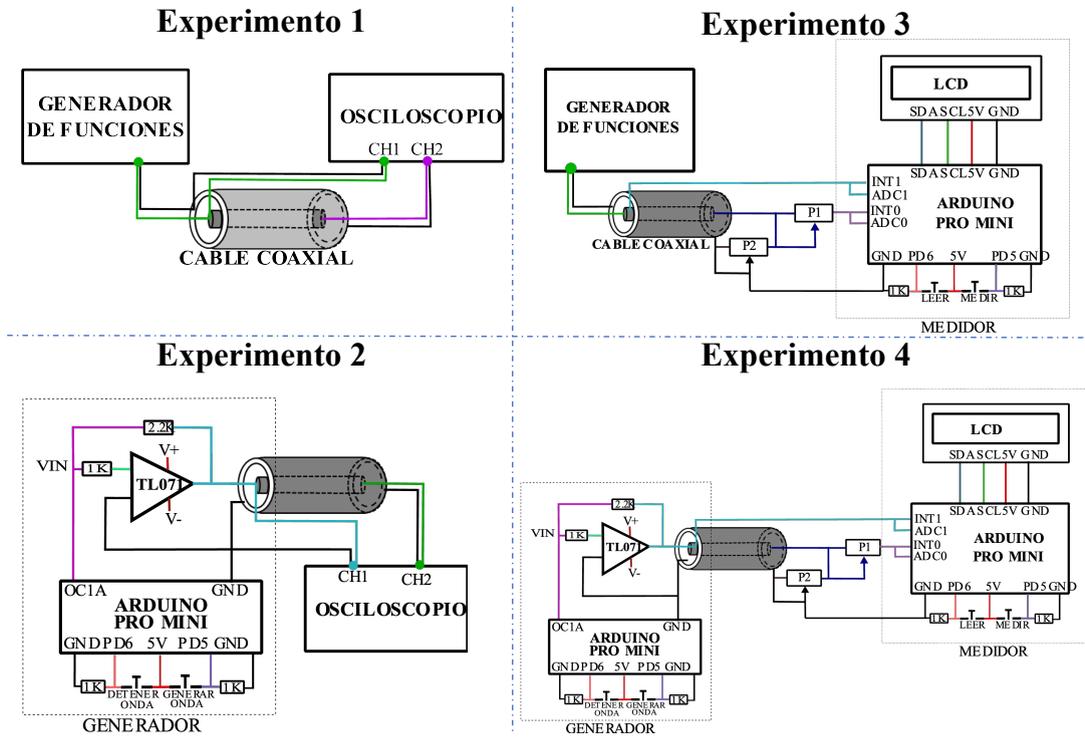


Figura 6. Diagrama de conexiones para los experimentos propuestos

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Comparativa de resultados obtenidos en la caracterización de la línea de transmisión

Parámetro	Valor		Experimento				% de error
	Nominal	Teórico	1	2	3	4	
$Z_0(\Omega)$	75	75	74,3	74	74,2	74,3	0
$\alpha(\text{dB/m})$	0,02	0,0197	0,0138	0,015	0,02	0,0148	7,5
$r(\mu\text{s})$	1,3	1,3	1,3	1,4	1,44	1,38	6,15
$\beta(\text{rad/m})$	0,00265	0,0027	0,0027	0,0029	0,003	0,0028	3,7
$v_p(\text{m/s})$	0,78c	0,78c	0,78c	0,73c	0,71c	0,74c	5,13
$R(\Omega/\text{m})$	0,146	0,146	0,141	0,17	0,148	0,149	5,68
$G(\text{S/m})$	7,38	6,85	7,1	5,88	6,74	6,73	5,22
$C(\text{pF/m})$	56,78	56,76	56,48	62	63,63	60,9	7,83
$L(\mu\text{H/m})$	0,318	0,318	0,312	0,34	0,35	0,34	8,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Comparativa económica entre el sistema propuesto y los equipos de laboratorio

Costos del sistema propuesto (COP)		Costos de los equipos de laboratorio (COP)	
2 Arduino Pro Mini	26.000	Generador de funciones SG2120 DDS	1.170.000
6 resistencias	1200		
2 potenciómetros	1600		
1 TL071	5800	Osciloscopio digital ADS1102CML	1.790.000
1 LCD 16x2	13.000		
4 pulsadores	1000		
Total	48.600	Total	2.960.000

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con una herramienta de identificación de los parámetros de las líneas de transmisión se pueden predecir las posibles pérdidas y problemas que se presentan cuando las ondas electromagnéticas viajan por el medio físico, del cual se debe considerar las posibles asimetrías y el desacople de impedancias en su estructura físicas, que seguramente causan errores y por ende desperdicio de energía.

De ahí que, con sistemas embebidos modernos, se facilita la medición experimental de dichos parámetros mediante la comprobación de su funcionamiento con la revisión de los datos teóricos y los del fabricante, y de forma directa y en campo con la validación de los mismos, por medio equipos de instrumentación electrónica, que para el caso de estudio, se utilizaron el generador de señales y el osciloscopio digital.

Con la herramienta desarrollada se infiere que los resultados son cercanos a los valores teóricos y que, al compararse con los instrumentos de medición electrónica (osciloscopio digital y generador de funciones), mide de forma exacta la impedancia característica; presenta un error porcentual del 3,7% cuando mide la constante de fase; y registra un error porcentual menor del 9% cuando mide constante de atenuación, retardo, velocidad de propagación, resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia. Lo anterior determina que el error máximo de las mediciones es 8,98%, lo que indica que el dispositivo desarrollado es adecuado para la medición de los parámetros de las líneas de transmisión.

La integración entre el algoritmo de *software* con el prototipo de *hardware* permite comprobar la medición de los parámetros de forma sistemática y confiable, sin necesidad de utilizar equipos de laboratorios costosos; esto garantiza el proceso del aprendizaje del comportamiento y funcionamiento de los parámetros eléctricos en un medio de transmisión de forma práctica, mediante la ejecución de

pruebas analíticas y correcciones en el algoritmo matemático, como se pudo evidenciar con la tabla 3.

Se observó que el cable se comporta como una cavidad resonante al realizar la calibración de los pulsos que están representados como las ondas incidente y reflejada para calcular la duración del retardo de la señal al variar la resistencia del potenciómetro. Esta situación puede generar un error de incertidumbre en la medición (como también la calibración de los equipos de laboratorio); pero, al comparar con las medidas en un ambiente controlado, es posible tener resultados favorables si se realizan más mediciones en campo.

Los costos de la herramienta desarrollada equivalen al 2% de las herramientas de laboratorios, como el osciloscopio y el generador de señales; esto permite considerar el sistema propuesto como una opción económica para la detección de fallas en LT de redes inteligentes.

REFERENCIAS

- [Ashford-Lee y Arunkumar-Seshia (2017)] Ashford-Lee, E. y Arunkumar-Seshia, S. (2017). *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. MIT Press. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2867966> ↑Ver página 102
- [Asprou *et al.*, 2019] Asprou, M., Kyriakides, E. y Albu, M. M. (2019). Uncertainty bounds of transmission line parameters estimated from synchronized measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(8), 2808-2818. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2867966> ↑Ver página 101
- [Costa *et al.*, 2017] Costa, F., Borgese, M., Degiorgi, M. y Monorchio, A. (2017). Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. *Electronics*, 6(4), 95. <https://doi.org/10.3390/electronics6040095> ↑Ver página 100
- [Chabane *et al.* (2017)] Chabane, S., Besnier, P. y Klingler, M. (2017). A modified enhanced transmission line theory applied to multiconductor transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(2), 518-528. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2611672> ↑Ver página 101
- [Cheng *et al.*, 1997] Cheng, D. K. (1997). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. 1.^a ed. Pearson Educación. ↑Ver página 100
- [Chen *et al.*, 2018] Chen, Y. Q., Fink, O. y Sansavini, G. (2018). Combined fault location and classification for power transmission lines fault diagnosis with integrated feature extraction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 561-569. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2721922>. ↑Ver página 101

- [Gallego *et al.* (2020)] Gallego, A., Bustos, E. y Reyes, J. (2020). Guided models for teaching students research in science and engineering. *Tecnura*, 24(66), 85-94. <https://doi.org/10.14483/22487638.16133> ↑Ver página 102
- [Giral *et al.* (2017)] Giral, W., Celedón, H., Galvis, E. y Zona, Á. (2017). Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: revisión de tema. *Tecnura*, 21(53), 119-137. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.3.a08>. ↑Ver página 101
- [Hayt *et al.*, 2006] Hayt, W. H. y Buck, J. A. (2006). *Teoría electromagnética*. McGraw-Hill/Interamérica. ↑Ver página 100
- [Jing *et al.* (2018)] Jing, L., Wang, W., Li, Z. y Murch, R. D. (2018). Detecting impedance and shunt conductance faults in lossy transmission lines. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(7), 3678-3689. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2829812> ↑Ver página 100
- [Lapp Tannehill (2019)] Lapp Tannehill (2019). *Coaxial Cable*. <https://www.lapptannehill.com/wire-cable/coaxial-cable>. ↑Ver página 109
- [Liu *et al.* (2016)] Liu, L., Geng, J., Liu, F., Fan, H., Liang, X., Wang, W. y Jin, R. (2016). A novel analytical method for multi-frequency transmission line transformer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 26(8), 556-558. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2585555> ↑Ver página 101
- [Manfredi *et al.* (2016)] Manfredi, P., De Zutter, D. y Ginste, D. V. (2016). Analysis of nonuniform transmission lines with an iterative and adaptive perturbation technique. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(3), 859-867. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2523604> ↑Ver página 100, 101
- [Neri Vela, 1999] Neri Vela, R. (1999). *Líneas de transmisión*. 1.ª ed. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.1999.01n2.009> ↑Ver página 100
- [Noergaard (2005)] Noergaard, T. (2005). *Embedded systems architecture: A comprehensive guide for engineers and programmers*. Elsevier Inc. ↑Ver página 102
- [Parada *et al.*, 2016] Parada, E., Illera, M., Sepúlveda, S., Guevara, D. y Medina, B. (2016). Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia. *Tecnura*, 20(49), 120-132. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a08> ↑Ver página 101
- [Rabaani *et al.* (2019)] Rabaani, K., Added, M., Boulejfen, N., Kouki, A. y Ghanounichi, F. (2019). Frequency domain analysis of periodic non uniform substrate integrated waveguide transmission lines. En *2019 IEEE 19th Mediterranean Microwave Symposium 2019* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/MMS48040.2019.9157270> ↑Ver página 101

- [Reynoso *et al.*, 2020] Reynoso, J., Apolinar, M. A., Pulido, R., Cuesta, J., Loo, R. y Maya, D. C. (2020). Transmission line impedance characterization using an uncalibrated vector network analyzer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(5), 528-530. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2984377> ↑Ver página 101
- [Sadiku, 2003] Sadiku, M. N. O. (2003). *Elementos de electromagnetismo*. 3.^a ed. Oxford. ↑Ver página 100
- [Shlivinski y Hadad, 2018] Shlivinski, A. y Hadad, Y. (2018). Beyond the Bode-Fano bound: Wide-band impedance matching for short pulses using temporal switching of transmission-line parameters. *Physical Review Letters*, 121(20), 204301. 1 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.204301> ↑Ver página 101
- [Ulaby, 2017] Ulaby, F. T. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*. Pearson Educación. ↑Ver página 100
- [Xue *et al.*, 2020] Xue, A., Xu, F., Martin, K. E., You, H., Xu, J., Wang, L. y Wei, G. (2020). Robust identification method for transmission line parameters that considers PMU phase angle error. *IEEE Access*, 8, 86962-86971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992247> ↑Ver página 101
- [Yin *et al.* (2015)] Yin, G., Cai, X. D., Secker, D., Ortiz, M., Cline, J. y Vaidyanath, A. (2015). Impedance perturbation theory for coupled uniform transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(2), 299-308. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2377050> ↑Ver página 101
- [Zurawski (2018)] Zurawski, R. (2018). *Embedded systems handbook*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315218281> ↑Ver página 102

