



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica
EL41B - Laboratorio de redes
Profesor: Néelson Morales
Profesores Aux.: German C., David C. & Ariel Y.

Transmisión de línea coaxial

Pablo Tapia

Martes 28 de Octubre de 2008

Índice general

1. Presentación	2
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos	3
2. Desarrollo del informe	4
2.1. Marco Teórico	4
2.1.1. Puente de Wheatstone:	5
2.1.2. Puente de Wien:	6
2.1.3. Puente de Maxwell:	6
2.1.4. Impedancia característica de una línea de transmisión	7
2.1.5. Coeficiente de propagación en una línea de transmisión	7
2.1.6. Coeficiente de reflexión	8
2.2. Trabajo de Laboratorio	9
2.2.1. Experiencia I	9
3. Finalización	15
3.1. Conclusiones	15
3.2. Referencias	15
Índice de Figuras	16
Índice de Tablas	17

Capítulo 1

Presentación

1.1. Introducción

Es conocido que el movimiento y/o la simple presencia de cargas eléctricas, producen efectos sobre el medio en el que se encuentran. Estos efectos son conocidos como campos eléctricos, magnéticos y/o electromagnéticos, dependiendo del estado en el que se encuentren las cargas. Se sabe además que éstos se propagan en todos los medios en forma de ondas a distintas velocidades transportando energía y con ello información.

La necesidad de transmitir energía e información ha llevado a la construcción de materiales especiales que permiten recorrer largas distancias y que mantienen la calidad de la información. Con el fin de la transmisión de información es que, principalmente, se construyen varios tipos de, valga la redundancia, líneas de transmisión. Una de las más importantes de ellas es la de cable coaxial.

Con las líneas de transmisión, en lugar de resolver las ecuaciones de Maxwell y obtener los valores de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la línea (como se hace en el caso de propagación en otros medios), resulta más práctico y sencillo obtener las ecuaciones generales de la línea de transmisión a partir de un modelo circuital de diversas características. A partir del conocimiento de los parámetros del modelo circuital se puede medir, por ejemplo, la impedancia característica de una línea y caracterizar su nivel de desadaptación con respecto al generador y/o la carga, entre otras peculiaridades de la misma.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este laboratorio es experimentar a partir de una línea coaxial con largo variable, determinar los parámetros de su circuito equivalente y posteriormente estudiar los efectos derivados de la desadaptación a las cargas, la reflexión de ondas y la generación de ondas estacionarias en la misma, comparando y referenciando a la teoría que las modeló en cada sección de la experimentación.

Los parámetros a determinar correspondieron a las componentes del circuito equivalente de una línea coaxial, entendiéndose: resistencias, admitancia, capacitancia e inductancia características de ésta. Para calcular cada uno de estos parámetros se utilizaron diferentes tipos de configuraciones electrónicas denominadas *puentes*. Éstos corresponden al puente de Wheatstone, Wien y Maxwell los cuales en conjunto con un proceso de medición permitieron obtener los parámetros buscados.

Para estas líneas se estudió además tanto la reflexión de ondas, producto de la variación en la carga y distintos largos de la línea, como la formación de ondas estacionarias. Utilizando un generador de señales, el osciloscopio y un sistema de medidas detallado, se calculó también la velocidad de propagación de las ondas para distintos largos de ésta y luego mediante la variación de la carga se midió la ganancia de la señal para así concluir sobre las características generales de las ondas en las líneas de transmisión.

Para todo esto es necesario un exhaustivo trabajo con los materiales del laboratorio y en especial el trabajo con líneas coaxiales, circuitos integrados y medidores de corriente. Dado esto el objetivo más importante que se pretende con este laboratorio es lograr una familiarización con el uso de estos implementos para la importante adquisición de conocimientos al respecto.

Capítulo 2

Desarrollo del informe

2.1. Marco Teórico

En las líneas de transmisión, en lugar de resolver las ecuaciones de Maxwell y obtener los valores de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la línea, resulta más práctico y sencillo obtener las ecuaciones generales de la línea de transmisión a partir de un modelo circuital, en términos de resistencia, inductancia, conductancia y capacitancia por unidad de longitud de la línea. Al conocer estos parámetros es posible calcular la impedancia de la línea. La diferencia de impedancias entre generador, línea de transmisión y carga, implica desadaptación del conjunto, cuyo efecto principal es la creación de ondas reflejadas, lo cual genera efectos indeseados como interferencias, pérdidas de información y de potencia.

Como ya se dijo, uno de los tipos más usados de líneas de transmisión es el cable coaxial, el cual consiste en un conductor interno y un revestimiento coaxial externo separado por un medio dieléctrico. En esta estructura los campos eléctricos y magnéticos están confinados en el dieléctrico. Los cables de conexión entre ordenadores para transmisión de datos o cables de entrada en instrumentos de medida son ejemplos de utilización de cable coaxial.

En cursos previos se han estudiado circuitos cuya longitud era pequeña comparada con la longitud de onda de la señal que se propagaba. En ese caso, los elementos del circuito se representaban mediante elementos (resistor, inductor, condensador) concentrados en un determinado punto del circuito, sin embargo, en las líneas de transmisión la longitud de la línea puede ser comparable o superior a la longitud de onda de la señal electromagnética que se propaga. Dado lo anterior se suele considerar un circuito representativo de la línea de transmisión, donde a los elementos de éste se les llama *elementos distribuidos*.

Se presenta a continuación el diagrama circuital de un elemento diferencial de la línea de transmisión de longitud dx .

Donde éste, como se menciono anteriormente se encuentra descrito por los siguientes parámetros distribuidos (Fig. 2.1):

- R [Ω /m], la resistencia por unidad de longitud. Modela pérdidas por efecto Joule.
- L [H/m], la inductancia por unidad de longitud. Modela el campo magnético producido por flujo de corriente.
- G [S/m], la conductancia por unidad de longitud entre los dos hilos. Modela efectos producidos por corrientes de fuga.
- C [F/m], la capacitancia entre los dos conductores por unidad de longitud.

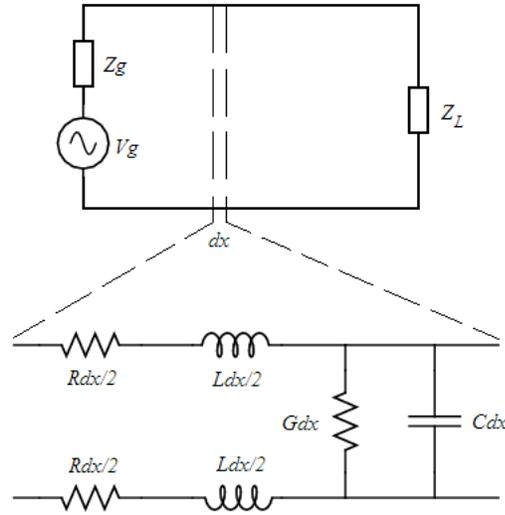


Figura 2.1: Modelo de parámetros distribuidos para una línea de transmisión

Estos parámetros pueden ser determinados a partir de *circuitos puente*. Un circuito puente se utiliza, generalmente, para medir parámetros como resistencias, inductancias o capacitancias a partir de otros componentes de valores conocidos.

Si bien se conoce la existencia de varios circuitos puente, en el laboratorio fue necesaria la utilización de los puentes de Wheatstone (para medir resistencia), de Wien (para medir capacitancia) y de Maxwell (para medir inductancia). A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos:

2.1.1. Puente de Wheatstone:

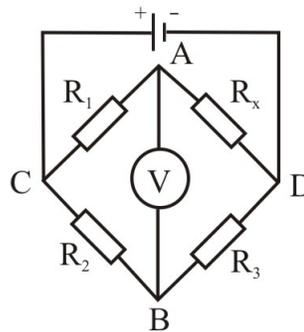


Figura 2.2: Puente de Wheatstone

Se dice que el puente de Wheatstone está equilibrado cuando la diferencia de potencial entre los puntos A y B es nula, en esta situación, I_1 representa la corriente eléctrica que pasa por R_1 y también por R_X , ya que al ser $V_{AB} = 0$ no pasa corriente por AB . Además, I_2 es la corriente que circula por R_2 y R_3 , luego se cumple que:

$$V_{CA} = V_{CB} = I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2.1)$$

$$V_{AD} = V_{BD} = I_1 R_x = I_2 R_3 \quad (2.2)$$

De lo que se deduce:

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (2.3)$$

Donde R_x representa la resistencia característica de la línea.

2.1.2. Puente de Wien:

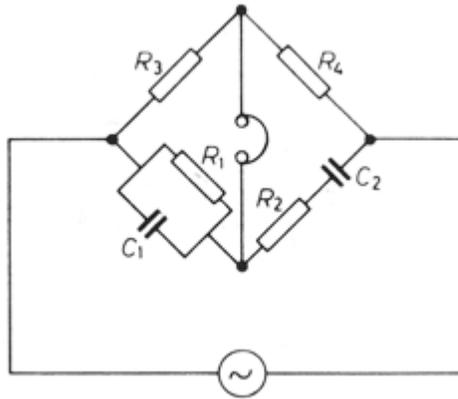


Figura 2.3: Puente de Wien

Circuito puente de CA consistente en: una rama que consta de una resistencia y una capacitancia en serie, una rama contigua a la anterior formada por una resistencia y una capacitancia en paralelo y dos ramas restantes puramente resistivas. El puente indicado en la figura 2.3 se usa para medida de capacitancias en términos de resistencia y frecuencia. Siguiendo un análisis similar al del caso anterior, cuando no hay circulación de corriente por el detector, es decir, cuando el puente está balanceado, se llega a las siguientes relaciones (suponiendo que R_1 y C_1 se desconocen):

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3} C_2 \quad (2.4)$$

$$R_1 = \frac{R_3}{\omega^2 C_2^2 R_2 R_4} \quad (2.5)$$

2.1.3. Puente de Maxwell:

Red en puente de CA en la cual una rama está compuesta de una inductancia y una resistencia en serie, la opuesta, de un condensador y una resistencia en paralelo y las otras dos ramas, de resistencias. El puente se ilustra en la figura 2.4 y se usa para la medida de inductancias (en función de un condensador conocido) o capacidades (en función de una inductancia conocida), siendo las relaciones de equilibrio:

$$R_1 = \frac{R_4 R_2}{R_3} \quad (2.6)$$

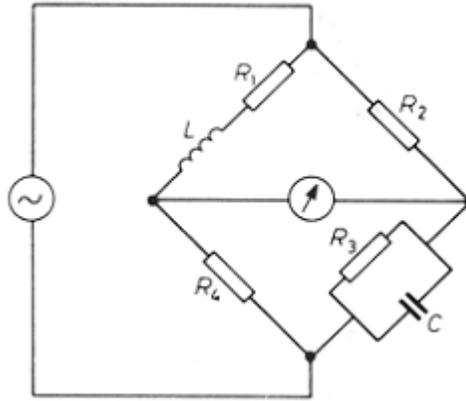


Figura 2.4: Puente de Maxwell.

$$L = R_2 R_4 C \quad (2.7)$$

2.1.4. Impedancia característica de una línea de transmisión

Se denomina *impedancia característica* (Z_0) de una línea de transmisión a la relación existente entre la diferencia de potencial aplicada y la corriente absorbida por la línea en el caso hipotético de que ésta tenga una longitud infinita o, cuando aún siendo finita, no existen reflexiones. La impedancia característica puede expresarse a través de los parámetros circuitales como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + iwL}{G + iwC}} \quad (2.8)$$

En una línea de transmisión sin pérdidas se cumple que $R = 0$ y $G = 0$. En este caso, la impedancia característica es:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.9)$$

Cabe destacar que cuando la frecuencia de la onda transmitida es superior a los $10kHz$, se puede hacer una aproximación de la forma general 2.8 a 2.9, pues los valores de R y C serían despreciables frente a los valores de frecuencia.

2.1.5. Coeficiente de propagación en una línea de transmisión

La constante de propagación (a veces llamada el coeficiente de propagación) se utiliza para expresar la atenuación (pérdida de la señal) y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión. Conforme se propaga una onda, a lo largo de la línea de transmisión, su amplitud se reduce con la distancia viajada. La constante de propagación se utiliza para determinar la reducción en voltaje o corriente en la distancia conforme una onda TEM se propaga a lo largo de la línea de transmisión.

Para una línea infinitamente larga, toda la potencia incidente se disipa en la resistencia del cable, conforme la onda se propague a lo largo de la línea. Por lo tanto, con una línea infinitamente larga o una

línea que se ve como infinitamente larga, como una línea finita se termina en un carga acoplada ($Z = Z_L$), no se refleja ni se regresa energía nuevamente a la fuente. Matemáticamente, la constante de propagación es $\gamma = \alpha + i\beta$, donde α representa una constante de atenuación (nepers por unidad de longitud) y β coeficiente de desplazamiento de fase (radianes por unidad de longitud).

La constante de propagación podemos definirla en base a los parametros de la linea de la forma:

$$\gamma = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)} \quad (2.10)$$

Además, ya que un desplazamiento de fase de 2 rad ocurre sobre una distancia de una longitud de onda tenemos que:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.11)$$

Por ultimo, a frecuencias de radio e intermedias $wL > R$ y $wC > G$ podemos expresar entonces α y β como:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2} \quad (2.12)$$

$$\beta = \sqrt{LC} \quad (2.13)$$

2.1.6. Coeficiente de reflexión

Sabemos que las ondas de voltaje e intensidad que se propagan en una línea finita cuando existe desacoplamiento, están formadas por la superposición de una onda incidente y otra reflejada. Se llama coeficiente de reflexión de voltaje en la carga a la razón de las amplitudes de las ondas de voltaje reflejada e incidente y podemos expresarlo como:

$$\Gamma_{V_l} = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (2.14)$$

Se observa que $-1 \leq \Gamma_{V_l} \leq 1$, como es lógico por su definición.

El coeficiente de reflexión de voltaje en la entrada de la línea es:

$$\Gamma_{V_g} = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (2.15)$$

Nótese que si $Z_l = Z_0$, no hay onda reflejada en la carga, en este caso se dice que la línea de transmisión está adaptada a la carga. Análogamente, si $Z_g = Z_0$, no hay onda reflejada en la fuente y en este caso se dice, entonces, que la línea está adaptada a la fuente.

Finalmente, como la tensión y la corriente en un punto de la línea son, en general, la superposición de una onda incidente y otra reflejada, habrá puntos de la línea en los que esta suma será constructiva (máximos) y otros en los que será destructiva (mínimos), dando lugar a una onda estacionaria. Se define la razón de onda estacionaria como:

$$S = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma_{V_i}|}{1 - |\Gamma_{V_i}|} \quad (2.16)$$

2.2. Trabajo de Laboratorio

Durante el desarrollo del presente trabajo de laboratorio se utilizaron los siguientes equipos:

- Modulo básico SO4201-2C
- Línea de transmisión coaxial SO4201-9Q
- Transmisor coaxial (Tarjeta) SO4201-9P, que posee:
 - Puentes de medición
 - Generador de impulsos
- Generador de señales
- Osciloscopio
- Fuente de 5 Volts Corriente Continua
- Multímetro

2.2.1. Experiencia I

Determinación de las Características de una Línea Coaxial.

Básicamente, con la ayuda de circuitos puentes, se determinó el valor de los parámetros que caracterizan a una línea de transmisión coaxial: Resistencia de los conductores, Inductancia, Capacitancia y Conductancia transversal.

Cálculo de la Resistencia del conductor interior y exterior

Objetivos:

En esta sección se buscó medir la resistencia de una línea coaxial para varias longitudes ocupando el puente de Wheatstone y luego calcular su valor promedio.

Procedimiento: A continuación se enumera paso a paso el procedimiento realizado:

- Se colocó la tarjeta SO4201-9P en el módulo de trabajo SO4201-2C
- Luego, los puentes conectores fueron insertados en la tarjeta SO4201-9P, como se muestra en la figura siguiente:
- Se conectó la alimentación de 0 y 5 Volts al módulo de trabajo SO4201-2C
- El generador de señales fue conectado a la tarjeta en SNin y ajustado para transmitir una onda seno de 10Volts peak-to-peak y 10 KHz
- La Línea Coaxial fue conectada como carga (entre MP3 y GND). Además, se cortocircuitó la salida del Cable Coaxial, para una longitud de 20 metros

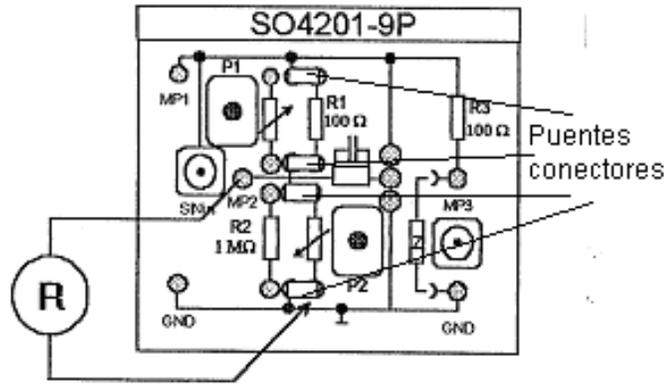


Figura 2.5: Esquema circuital para calculo de resistencia.

- Se colocaron las puntas del Osciloscopio en atenuación 1:1
- El punto tierra de la tarjeta (GND) fue conectado al osciloscopio
- Los canales 1 y 2 del osciloscopio se conectaron a MP2 y MP3, respectivamente.
- En el modo dual del osciloscopio, se superpusieron las señales. Luego el potenciómetro P2 fue ajustado hasta que las dos señales sinusoidales tuvieran la misma amplitud. De esta forma se logró la condición de equilibrio del circuito.
- El generador de señales y los puentes conectores del potenciómetro P2 son desconectados para medir la resistencia de P2, mediante un multímetro.

El valor característico de la resistencia de línea se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$R' = \frac{R_{P2}}{L} \quad (2.17)$$

Donde:

- R_{P2} : Resistencia medida del potenciómetro P2
 - L : Longitud de línea del cable coaxial
- Se repitió todo lo anterior para la longitud de 40 metros. Luego se calculó la resistencia promedio de la línea.

Resultados:

Finalmente, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

	Longitud [m]	Rp2 [Ω]	R' [Ω]
Línea 1	20	7.45	0.397
Línea 2	40	18	0.4866
Promedio [m]	—	—	0.4418

Tabla 2.1: Tabla de resultados obtenidos para el calculo de resistencias en las lineas de transmisión

Conclusiones:

La resistencia de una línea coaxial obtenida para varias longitudes ocupando el puente de Wheatstone fue de $0.4 \text{ [}\Omega \text{]}$ para 20[m] y de $0.49 \text{ [}\Omega \text{]}$ para 40[m] . Así su valor promedio fue de $0.44 \text{ [}\Omega \text{]}$.

Claramente las medidas tienen un error pues se espera que el valor de la resistencia varía linealmente con la longitud de la línea. Es decir, si para 20 metros de línea se obtiene una resistencia de a hms, entonces para 40 debe ser aproximadamente de $2a$ hms. A pesar de la gran cantidad de fuentes de error, se cree que éste se debe al mal funcionamiento del multímetro.

Cálculo de la Capacidad de la Línea

Objetivo:

El objetivo de esta parte fue medir la capacidad de una línea coaxial para varias longitudes ocupando el puente de Wien y calcular al valor promedio.

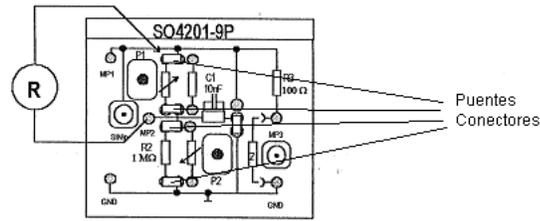


Figura 2.6: Esquema circuitual para cálculo de la capacitancia característica en una línea de transmisión

Procedimiento:

Para medir la capacidad de la línea se llevó a cabo un procedimiento similar al descrito para la experiencia anterior. Las diferencias entre dicha actividad y la presente son:

- El generador de señales fue conectado a la tarjeta en SNin y ajustado para transmitir una onda seno de 10Volts *peak-to-peak* y 100 KHz.
- Los puentes conectores fueron conectados de la siguiente manera:
- En lugar manipular el potenciómetro P2 se operó con el potenciómetro P1. Es decir, una vez superpuestas las señales observadas en el osciloscopio (en modo dual), se ajustó el *potenciómetro P1* de tal manera que ambas señales quedaran con la misma amplitud, logrando así la condición de equilibrio de este circuito.

Por ultimo, se midió la resistencia del potenciómetro P1, usando un multímetro. El valor característico de la capacidad de la línea se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$C' = \frac{C_1 R_{P1}}{L R_3} \quad (2.18)$$

Donde:

- L : Longitud de la línea de transmisión coaxial
- R_{P1} : Medición de la resistencia del potenciómetro 1(P1)
- $C_1 = 10[nF]$
- $R_3 = 100[\omega]$

Luego, nuevamente se repitió el procedimiento para la longitud de 40 metros y se calculó la capacidad promedio de la línea.

Resultados:

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

	Longitud [m]	Rp1 [Ω]	C' [pF]
Línea 1	20	49.87	251
Línea 2	40	55	150
Promedio capacidad	—	—	200.5

Tabla 2.2: Tabla de resultados obtenidos para el calculo de capacitancias en las lineas de transmisión

Conclusiones:

La capacidad de una línea coaxial obtenida para varias longitudes ocupando el puente de Wien fue de 251 [pF] para 20 [m] y de 150 [pF] para 40[m]. Así, valor promedio fue de 200.5[pF].

Es muy claro que existe un error muy grande pues la capacitancia disminuye con el largo de línea y se sabe, a partir de la teoría, que esta debe aumentar. Este grave error claramente se debe al mal estado en el que se encuentran los equipos, en especial las líneas coaxiales.

Cálculo de la Inductancia de la Línea

Objetivos:

Durante esta parte de la experiencia se buscó medir la inductancia de una línea coaxial para varias longitudes ocupando el puente de y calcular su valor promedio.

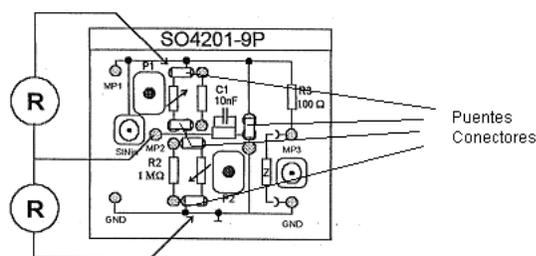


Figura 2.7: Esquema circuitual para calculo de la inductancia caracteristica en una línea de transmisión

Procedimiento:

Nuevamente se realizó un procedimiento análogo al descrito en la sección del cálculo de la resistencia del conductor interior y exterior, salvo que en esta ocasión las diferencias son:

- El generador de señales fue conectado a la tarjeta en SNin y ajustado para transmitir una onda seno de 10Volts peak-to-peak y 200 KHz.
- Los puentes conectores fueron conectados de la siguiente manera:
- Una vez superpuestas las señales observadas en el osciloscopio (en modo dual), se ajustaron el *potenciómetro P2* y el *P1* de tal manera que ambas señales quedaran con la misma amplitud y con la misma

fase (debido a los ajustes de P2 y P1 respectivamente), logrando así la condición de equilibrio de este circuito.

Luego se midió la resistencia del potenciómetro P2, con un multímetro.

El valor característico de la inductancia de la línea se determina por medio de la siguiente ecuación:

Se repitió el procedimiento para la longitud de 40 metros y se calculó la inductancia promedio de la línea.

Resultados:

Los datos obtenidos se resumen como sigue:

	Longitud [m]	Rp1 [Ω]	Rp2 [Ω]	L' [nH]
Línea 1	20	90	10	560
Línea 2	40	77.3	15	419.5
Promedio	—	—	—	489.75

Tabla 2.3: Tabla de resultados obtenidos para el calculo de inductancias en las lineas de transmisión

Conclusiones:

La inductancia de una línea coaxial obtenida para varias longitudes ocupando el puente de Maxwell fue de 560 [nH] para 20 [m] y de 419.5 [nH] para 40 [m]. Así, su valor promedio fue de 489.75 [nH].

Estos resultados son consecuentes con la teoría pues como se sabe la inductancia disminuye cuando el área transversal se mantiene constante y el largo de la línea aumenta.

Cálculo de la Impedancia Característica de la Línea Coaxial

Objetivos:

Durante esta sección se quiere calcular la impedancia característica de la línea coaxial utilizando los datos obtenidos en las experiencias anteriores.

Procedimiento:

A partir de 2.8, se obtiene el valor de la impedancia característica de una línea de transmisión:

Sin embargo dado que estamos trabajando con frecuencias por encima de los $10kHz$ se utiliza la aprox. de esta vista en la ecuación 2.9 y los valores promedios de la inductancia y capacitancia de la línea se logró calcular la impedancia característica de la misma. Por otro lado, para calcular la constante de propagación se recurre a la ecuación 2.13

Resultados:

La impedancia característica de la línea coaxial medida en esta experiencia es de:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 49,3422[\Omega]$$

Mientras que el valor de su constante de propagación es de:

$$\gamma = \sqrt{LC} = 9,9561$$

Donde:

- L : Inductancia medida característica de la línea de transmisión.
- C : Capacitancia medida característica de la línea de transmisión.

Conclusiones:

La impedancia característica y la constante de propagación de la línea coaxial obtenida utilizando los datos obtenidos en las experiencias anteriores fue de $49,3422[\Omega]$ y de $9,9561$

Capítulo 3

Finalización

3.1. Conclusiones

Como conclusión general se puede decir que se logró a cabalidad la experiencia en el sentido de que se pudo tener contacto directo con las líneas de transmisión coaxial y los circuitos integrados utilizados para medir sus características, pues todas las medidas lograron ser tomadas, sin embargo debido a desperfectos técnicos las mediciones no pueden ser tomadas como verdaderas.

Se logró medir mediante el uso de circuitos integrados la resistencia, capacitancia e inductancia características de varios largos de una línea de transmisión coaxial.

Como conclusión final, cabe destacar la importancia de que todos los elementos que componen un sistema de transmisión presenten en las partes conectadas a la línea impedancias idénticas a la de ésta, de este modo, se limitará la presencia de ondas reflejadas y se tenderá a optimizar el rendimiento de la transferencia.

3.2. Referencias

- CHIPMAN, ROBERT. 1971. Teoría y Problemas de Líneas de Transmisión. Ed. McGraw-Hill.
- JOHNSON, WALTER. 1950. Transmission Lines and Networks. Ed. McGraw-Hill.
- <http://www.wikipedia.org>

Índice de figuras

2.1. Modelo de parámetros distribuidos para una línea de transmisión	5
2.2. Puente de Wheatstone	5
2.3. Puente de Wien	6
2.4. Puente de Maxwell.	7
2.5. Esquema circuital para calculo de resistencia.	10
2.6. Esquema circuital para calculo de la capacitancia caracteristica en una linea de transmisión .	11
2.7. Esquema circuital para calculo de la inductancia caracteristica en una linea de transmisión .	12

Índice de tablas

2.1. Tabla de resultados obtenidos para el calculo de resistencias en las lineas de transmisión . . .	10
2.2. Tabla de resultados obtenidos para el calculo de capacitancias en las lineas de transmisión . .	12
2.3. Tabla de resultados obtenidos para el calculo de inductancias en las lineas de transmisión . .	13