



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LOPEZ MATEOS”
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“ESTUDIO DEL MODELO DEL CANAL DE
COMUNICACIÓN DE REDES PLC DOMESTICAS
CONSIDERANDO EL CASO NO UNIFORME”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

PRESENTA

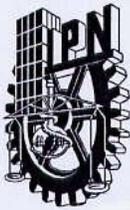
ING. EZEQUIEL IGNACIO ESPINOSA RIVAS

ASESOR:

M. en C. José Héctor Caltenco Franca



México D.F. Junio 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

SIP-14

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 31 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-Zacatenco para examinar la tesis titulada:

“ESTUDIO DEL MODELO DEL CANAL DE COMUNICACIÓN DE REDES PLC DOMÉSTICAS CONSIDERANDO EL CASO NO UNIFORME”

ESPINOSA
Apellido paterno

RIVAS
Apellido materno

EZEQUIEL IGNACIO
Nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	3	3	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

EL DIRECTOR DE TESIS

M. EN C. JOSÉ HÉCTOR CALTENCO FRANCA

Presidente

Segundo Vocal

DR. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQUEZ

M. EN C. RODRIGO JIMÉNEZ LÓPEZ

Tercer Vocal

Secretario

M. EN C. SALVADOR RICARDO MENESES GONZALEZ

DR. ROBERTO EINARES Y MIRANDA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D. F. el día 14 del mes Junio del año 2011, el (la) que suscribe Ezequiel Ignacio Espinosa Rivas alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con número de registro A090332, adscrito a Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. José Héctor Caltenco Franca y cede los derechos del trabajo intitulado *Estudio del Modelo del Canal de Comunicación de Redes PLC Domesticas Considerando el caso no Uniforme*, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección eespinosar0901@ipn.mx, jcaltenco@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Ezequiel Ignacio Espinosa Rivas

Nombre y firma

RESUMEN

En la tesis se presenta una breve introducción a los sistemas PLC (Power Line Communication), en donde se proporciona una descripción general del cómo funcionan y que elementos los componen.

Se realiza una revisión a diversos conceptos básicos de la Teoría de Líneas de Transmisión ya que esta describe características muy importantes del comportamiento de la señal, tales como: atenuaciones, reflexiones, velocidad de propagación, etc., necesarias todas ellas para entender la propagación de la señal en la red eléctrica y con ello lograr un mejor entendimiento de los diversos modelos de análisis del canal PLC y después desarrollar una propuesta de análisis basada en estos conceptos y modelos ya desarrollados en la literatura.

Como aportación del presente trabajo de tesis se presenta un modelo de análisis en el cual se considera que la red de energía eléctrica doméstica no es uniforme a lo largo de ella, en su constitución y geometría, ya que aunque existen diversos modelos desarrollados estos consideran a la línea como uniforme. Para validar el modelo propuesto se realizaron diversas mediciones de la Función de Transferencia a una red eléctrica dentro de un conduit a la cual se le conectaron diversas cargas.

Se presenta también un comparativo entre los resultados del modelo propuesto y los obtenidos de diversos modelos encontrados en la literatura en una línea uniforme además se comparan los resultados obtenidos de manera experimental con los obtenidos a través del modelo propuesto mediante el uso de algunos conceptos estadísticos, como son: el factor de correlación r y el error cuadrático medio $rmse$ (root mean square error).

ABSTRACT

A brief introduction to the PLC (Power Line Communications) Systems, providing a general description of the general work and the different elements that compose the systems are presented in this Thesis.

A review of several fundamental concepts of the Theory of Transmission Lines is carried out, with the purpose of describing some important characteristics of the behavior of the signals, as attenuations, reflections, propagation velocity, etc., all of them are necessary to get an understanding about the propagation of the signal in the power line for a best understanding different models of analysis of the power line channel and this way to develop a new model based in these concepts, considering different models developed in the literature.

As a contribution of this thesis, we consider a model of analysis in which the power lines in-home are not uniform, especially in their composition and geometry.

The difference of the model presented in comparing with the models in the literature consists in that all of them are uniform models. In order to validate the model here presented, several measurements of transfer function were made in power line inside a conduit, in which was connected different appliance loads.

A comparative between the results in the no uniform transmission line was made on the proposed model and the results was compared with different models found in the literature, besides the results of the experimental measurements was compared with the theoretical results via some statistical concepts as the correlation factor and root mean square error.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Basados en los principales modelos de análisis del canal de comunicaciones de banda ancha en las redes de energía eléctrica desarrollar un modelo que considere el problema de la no uniformidad de la línea para calcular el efecto que esta tiene sobre la operación de la red como canal PLC.

Objetivos particulares:

Estudiar el efecto que tienen las multitrayectorias o bifurcaciones sobre la Función de Transferencia (F. de T.) del canal PLC.

Diseñar y construir el circuito de acoplamiento para la incorporación de una señal de alta frecuencia a la red eléctrica de baja tensión.

Estudiar el efecto de la no uniformidad de la línea y proponer un modelo del canal PLC bajo estas condiciones.

Validar el modelo propuesto con los resultados obtenidos de manera experimental.

Comparar los resultados obtenidos con el modelo propuesto y los resultados obtenidos mediante los modelos reportados en la literatura.

JUSTIFICACIÓN

La idea de sobreponer una señal portadora de información sobre la red eléctrica ha sido llevada a la práctica desde hace más de un siglo, finales del siglo XIX. En un principio las compañías eléctricas la utilizaron para implementar sus propias redes telefónicas así como para la transmisión de información en el control de las centrales y subestaciones eléctricas. Esto se dio en las redes de alta y media tensión ya que la topología de estas redes es simple y provoca que su Función de Transferencia pueda ser predicha con facilidad, y en las redes de baja tensión la aplicación de esta rama de la tecnología PLC fue dejada atrás ya que la complejidad de su topología hacía que una comunicación confiable fuera una tarea muy difícil de realizar.

Más tarde en la década de los 80's y 90's del siglo XX el deseo de automatización de los hogares, desde el encendido y apagado de lámparas, aire acondicionado, sistemas de alarma, hasta la incorporación de aplicaciones multimedia que incluían el grabar y transmitir programas de radio y televisión a través de la red eléctrica aceleró la investigación de la tecnología PLC doméstica a la cual se le incorporaría después, debido al bajo costo que se venía dando en las computadoras personales, las redes de área local (LAN). Y como en los años subsecuentes la World-Wide Web o Internet llegó a ser una realidad y el número de computadoras por casa se incrementó, las redes domésticas se convirtieron en un importante blanco para las empresas del sector de las tecnologías de la información, por lo que PLC se convirtió en una opción más para implementar redes de computadoras con acceso a internet.

El gran obstáculo que presentaron las redes PLC domésticas es que la red eléctrica no fue diseñada originalmente como medio de comunicación por lo que las propiedades propias de esta así como la topología y los electrodomésticos conectados a la red causan grandes pérdidas en la señal transmitida y alimentan de armónicos y otros ruidos de fondo a la red de una manera impredecible, contaminando el canal. Estas desventajas inherentes de la red eléctrica hacen que el canal PLC doméstico sea impredecible y difícil de modelar ya que

los aparatos conectados a esta causan severos e inesperados cambios (fluctuaciones) en la impedancia de la línea que hacen que el acoplamiento sea imposible.

Aunque en la actualidad ya se han desarrollado diversos modelos de análisis del canal PLC, todos ellos consideran que la línea eléctrica, el canal PLC, es uniforme tanto en su constitución como en su geometría, es decir, que la línea presenta las mismas características en el calibre de los conductores y las distancias que hay entre ellos a lo largo de esta pero en general, una red eléctrica doméstica se encuentra constituida de varias secciones de diferentes calibres, longitudes y separación entre conductores, es decir, no es uniforme. Por lo que es necesario el desarrollar un modelo de análisis que tome en consideración estas condiciones de no uniformidad y que mediante el mismo sea posible hacer cálculos del comportamiento de la señal que estén más apegados a la realidad.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS UTILIZADOS

C	Capacitancia (Farads)
dB	Decibel
EMC	Electromagnetic Compatibility
F. de T.	Función de Transferencia
f	Frecuencia de operación (Hertz)
F/m	Farads sobre metro
G	Conductancia (Simens)
H	Henrys
H/m	Henrys sobre metro
H(f)	Función de Transferencia
IP	Internet Protocol
L	Inductancia (Henrys)
MHz	Megahertz
Modem	Modulador - Demodulador
PC	Personal Computer
PLC	Powerline Communication
PVC	Cloruro de Polivinilo
R	Resistencia (Ohms)
R2P	Red de dos puertos
S/m	Siemens sobre metro
SRC	Serie Resonant Circuit
T	Matriz de parámetros de Transmisión
t_d	Tiempo de retardo de la línea (segundos)
T.V	Televisión
V_L	Voltaje en la carga (Volts)
v_p	Velocidad de fase de la línea (metros/segundo)
V_S	Voltaje en la fuente (Volts)
Z_0	Impedancia característica de la línea (Ohms)
Z_i	Impedancia de entrada de la línea (Ohms)

Z_L	Impedancia de carga (Ohms)
Z_S	Impedancia de fuente (Ohms)
α	Factor o constante de atenuación (Nepers, 1 Neper = 8.686 dB)
β	Factor o constante de cambio de fase (radianes/segundo)
γ	Factor o constante de propagación (1/metros)
ϵ	Permitividad dieléctrica efectiva (Farads/metro)
ϵ_r	Permitividad dieléctrica relativa (sin unidades)
ϵ_0	Permitividad del espacio libre, $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \cong 8.854 \times 10^{-12}$ (Farads/metro)
μ	Permeabilidad magnética efectiva (Henrys/metro)
μ_r	Permeabilidad magnética relativa (sin unidades)
μ_0	Permeabilidad magnética del espacio libre, $4\pi \times 10^{-7}$ (Henrys/metro)
ρ	Factor de acoplamiento
σ_c	Conductividad del conductor (Siemens/metro)
σ_d	Conductividad del dieléctrico (Siemens/metro)
τ	Tiempo de retardo de la línea (segundos)
δ	Efecto pelicular (metros)
Ω	Simbolo para expresar ohms
ω	Velocidad angular (radianes/segundo)

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
OBJETIVOS	III
Objetivo general:	iii
Objetivos particulares:	iii
JUSTIFICACIÓN	IV
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS UTILIZADOS	VI
INDICE DE CONTENIDO	VIII
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
¿Qué es la tecnología PLC?	1
Red PLC de media tensión	1
Red PLC de acceso	2
Red PLC doméstica.	3
Ventajas y desventajas de PLC	4
CAPITULO 1	
TEORIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	5
1.1 Introducción	5
1.2 Obtención de los parámetros L, C, R y G	6
Línea bifilar	6
Línea bifilar dentro de un conduit	7
Línea de tres conductores dentro de un conduit	9
1.3 Ecuación general de una línea de transmisión	13
1.4 Propagación en la línea	15
1.5 Impedancia de entrada de una línea de transmisión	16
Línea terminada en corto circuito	18
Línea terminada en circuito abierto	18
1.6 La Matriz de Transmisión	19
CAPITULO 2	
MODELOS DE ANALISIS DEL CANAL PLC UNIFORME	21
2.1 Introducción	21
2.2 Modelos para la línea sin bifurcaciones	22
Modelo de I.C Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos	22

Modelo de parámetros de Transmisión (sin bifurcaciones)	23
2.3 Modelos para la línea con bifurcaciones	24
Modelos de la línea con multitrayectorias	25
Modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster	26
Modelo Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos	27
Modelo de Holger Philipps, modelo eco	29
Modelos de la línea con N elementos en cascada	30
Modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan	31
Modelo Holger Philipps del Circuito Resonante Serie, SRC	33
Modelo de Parámetros de Transmisión (con bifurcaciones)	35
2.4 Evaluación de los diversos modelos	36

CAPITULO 3

MODELO DE ANALISIS DE LINEAS NO UNIFORMES POR PARAMETROS DE TRANSMISIÓN	45
3.1 Introducción	45
3.2 La línea vista como una red de dos puertos	45
3.3 La regla de la cadena	47
3.4 La prueba de simetría de la línea	49
3.6 La línea no uniforme con bifurcaciones	52
3.7 Mediciones y validación del modelo	53
Función de Transferencia de la línea sin bifurcaciones	54
Función de Transferencia de la línea con una bifurcación	56
Función de Transferencia de la línea con varias bifurcaciones	57
Prueba experimental de simetría del canal	61

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
4.1 Introducción	63
4.2 Evaluación de los modelos sin bifurcaciones	63
4.3 Evaluación de los modelos con bifurcaciones	64
4.4 Análisis de resultados para el canal no uniforme.	69
4.5 Efecto de la no uniformidad de la línea	70
4.6 Consideraciones sobre la no uniformidad y el número de secciones.	75
4.7 Consideraciones sobre la permitividad relativa y la tangente de pérdidas.	80

CONCLUSIONES 83

TRABAJO A FUTURO 85

APÉNDICE A

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR	86
A.1 Caracterización del acoplador diseñado	86

APÉNDICE B

GRAFICAS DE IMPEDANCIA DE ALGUNOS ELECTRODOMESTICOS	91
--	-----------

APÉNDICE C

CONCEPTOS ESTADÍSTICOS UTILIZADOS	96
C.1 Teoría de la Correlación	96
Correlación lineal	96
El estándar de estimación	97
Variación explicada y no explicada	98
Coeficiente de correlación	98
Observaciones acerca del coeficiente de correlación	99
C.2 Error cuadrático medio RMSE (Root Mean Square Error)	100

APÉNDICE D

PROGRAMAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE MATLAB	102
D.1 Modelo de I. C. Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos	102
D.2 Modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster	103
D.3 Modelo de Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos	104
D.4 Modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan y T. T. Lie	105
D.5 Modelo de Holger Philipps (Modelo Eco)	106
D.6 Modelo de Holger Philipps (Modelo Circuito Resonante Serie, SRC)	107
D.7 Modelo de Parámetros de Transmisión	108

REFERENCIAS	110
--------------------	------------

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Índice de Figuras

<i>Figura I.1 Diagrama de un sistema PLC</i>	1
<i>Figura I.2 Red PLC de media tensión utilizada solamente como medio de transporte de datos</i>	2
<i>Figura I.3 Esquema de la red PLC de acceso</i>	3
<i>Figura I.4 Esquema de una red PLC domestica</i>	3
<i>Figura 1.1 Circuito utilizado para analizar una línea de transmisión con parámetros distribuidos</i>	5
<i>Figura 1.2 Geometría de una línea bifilar</i>	6
<i>Figura 1.3 Geometría de una línea con dos conductores dentro de un conduit</i>	7
<i>Figura 1.4 Circuito equivalente de parámetros por unidad de longitud para una línea de transmisión con dos conductores dentro de un conduit.</i>	8
<i>Figura 1.5 Geometría de la línea con tres conductores dentro de un conduit</i>	9
<i>Figura 1.6 Diagrama de capacitancia equivalente en la línea</i>	11
<i>Figura 1.7 Segmentación de la excentricidad de los conductores cilíndricos coaxiales</i>	12
<i>Figura 1.8 Capacitancia entre dos pares de cables, Fase y Neutro</i>	13
<i>Figura 1.9 Línea de longitud infinita.</i>	15
<i>Figura 1.10 Línea finita acoplada</i>	16
<i>Figura 1.11 Línea finita desacoplada.</i>	16
<i>Figura 1.12 Línea de longitud l terminada con una carga arbitraria en $z = 0$.</i>	17
<i>Figura 1.13 Línea terminada en corto</i>	18
<i>Figura 1.14 Línea terminada en circuito abierto.</i>	19
<i>Figura 1.15 La línea considerada como una red de dos puertos.</i>	20
<i>Figura 2.1 Línea de transmisión</i>	22
<i>Figura 2.2 Cable con una rama (bifurcación)</i>	25
<i>Figura 2.3 Canal punto a punto de una red de energía eléctrica</i>	29
<i>Figura 2.4 Modelo de Eco</i>	30
<i>Figura 2.5 Diagrama detallado para una red con una sola rama</i>	31
<i>Figura 2.6 Circuito resonante serie</i>	34
<i>Figura 2.7 Modelo del circuito resonante serie</i>	34
<i>Figura 2.8 La línea con N bifurcaciones</i>	35
<i>Figura 2.9 Circuito equivalente de la figura 3.3</i>	36
<i>Figura 2.10 Topología de la línea eléctrica utilizada en las mediciones</i>	37
<i>Figura 2.11 Funciones de Transferencia experimental y teóricas de la línea uniforme de 25m sin bifurcaciones.</i>	37
<i>Figura 2.12 Línea uniforme de 25 m. con una bifurcación de 2 m. terminada en abierto</i>	38
<i>Figura 2.13 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto</i>	39
<i>Figura 2.14 Línea uniforme de 25 m. con dos bifurcaciones de 1.6 y 2 m terminadas en abierto</i>	39
<i>Figura 2.15 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 y 2 m terminadas en abierto.</i>	39
<i>Figura 2.16 Línea uniforme de 25 m. con tres bifurcaciones</i>	40
<i>Figura 2.17 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25m con tres bifurcaciones.</i>	40
<i>Figura 2.18 Línea uniforme de 25m con cuatro bifurcaciones.</i>	40
<i>Figura 2.19 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones.</i>	41
<i>Figura 2.20 Línea uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones</i>	41
<i>Figura 2.21 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones.</i>	41
<i>Figura 2.22 Línea uniforme de 25 m. con seis bifurcaciones</i>	42

<i>Figura 2.23 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m. con seis bifurcaciones.</i>	42
<i>Figura 2.24 Línea uniforme de 25 m. con siete bifurcaciones</i>	42
<i>Figura 2.25 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con siete bifurcaciones</i>	43
<i>Figura 3.1 La línea representada como una red de dos puertos.</i>	46
<i>Figura 3.2 Línea constituida de varias secciones</i>	48
<i>Figura 3.3 Distribución de los conductores en un segmento de la línea eléctrica</i>	51
<i>Figura 3.4 Línea de Transmisión no uniforme con bifurcaciones</i>	53
<i>Figura 3.5 Obtención de la Matriz ABCD entre las bifurcaciones</i>	53
<i>Figura 3.6 Comparativo entre la Función de Transferencia experimental uniforme y no uniforme, usando el modelo propuesto y los modelos de I.C Papaleonidopoulos y Parámetros T</i>	55
<i>Figura 3.7 Línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.</i>	56
<i>Figura 3.8 Función de Transferencia experimental y del modelo propuesto de la línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.</i>	56
<i>Figura 3.9 Línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.</i>	57
<i>Figura 3.10 Funciones de transferencia de la línea, experimentales y teóricas de la línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.</i>	57
<i>Figura 3.11 Línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones</i>	58
<i>Figura 3.12 Funciones de transferencia, experimental y teóricas, de la línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones.</i>	58
<i>Figura 3.13 Línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones</i>	58
<i>Figura 3.14 Funciones de Transferencia de la línea teóricas y experimentales de la línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones.</i>	59
<i>Figura 3.15 Línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones</i>	59
<i>Figura 3.16 Funciones de Transferencia teórica y experimental de la línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones</i>	59
<i>Figura 3.17 Línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones</i>	60
<i>Figura 3.18 Funciones de Transferencia experimental y teórica de la línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones.</i>	60
<i>Figura 3.19 Línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones</i>	60
<i>Figura 3.20 Funciones de Transferencia experimental y teórica de la línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones.</i>	61
<i>Figura 3.21 Línea no uniforme de 25 m con una bifurcación, a la cual se le intercambian de lugar la fuente y la carga</i>	61
<i>Figura 3.22 Funciones de Transferencia de la línea no uniforme de 25 m con una bifurcación a la cual se le intercambiaron de lugar la fuente y la carga.</i>	62
<i>Figura 4.1 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes para una línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.</i>	65
<i>Figura 4.2 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.</i>	65
<i>Figura 4.3 Funciones de Transferencia experimental, del modelo uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones</i>	66
<i>Figura 4.4 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones</i>	67
<i>Figura 4.5 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones</i>	67
<i>Figura 4.6 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones</i>	68
<i>Figura 4.7 Funciones. de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones</i>	68
<i>Figura 4.8 Funciones de Transferencia experimentales para una línea sin bifurcaciones, uniforme y no uniforme</i>	70

Figura 4.9 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con una bifurcación de 2 m terminada en abierto, uniforme y no uniforme	71
Figura 4.10 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto, uniforme y no uniforme	72
Figura 4.11 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con tres bifurcaciones, uniforme y no uniforme	72
Figura 4.12 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con cuatro bifurcaciones, uniforme y no uniforme	73
Figura 4.13 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con cinco bifurcaciones, uniforme y no uniforme	73
Figura 4.14 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con seis bifurcaciones, uniforme y no uniforme	74
Figura 4.15 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con siete bifurcaciones, uniforme y no uniforme	74
Figura 4.16 Comparativo entre los resultados obtenidos en una línea sin bifurcaciones experimentalmente, usando el modelo cuando se conoce la distribución de la línea y aplicando el procedimiento descrito en 3.5.	76
Figura 4.17 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 2.5 m. de longitud.	77
Figura 4.18 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 25 cm. de longitud.	77
Figura 4.19 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 5 cm. de longitud.	78
Figura 4.20 Factor de correlación y error cuadrático medio en función de la longitud las secciones	79
Figura 4.21 Comportamiento en frecuencia de la permitividad relativa ϵ_r del dieléctrico	81
Figura 4.22 Comportamiento en frecuencia de la tangente de pérdidas $\tan \delta$ del dieléctrico	81
Figura 4.23 Funciones de Transferencia experimental y del modelo de Parámetros T cuando ϵ_r y $\tan \delta$ son constantes y cuando están en función de la frecuencia.	82
Figura A.1 Circuito Acoplador propuesto	86
Figura A.2 Impedancia de entrada de la línea sin bifurcaciones	87
Figura A.3 Impedancia de entrada con siete bifurcaciones	88
Figura A.4 Respuesta del circuito acoplador con diversos valores de R_2 {Rval}	88
Figura A.5 Acoplador	90
Figura A.6 Respuesta en frecuencia del acoplador	90
Figura B.1 Caracterización de la impedancia de los electrodomésticos	91
Figura B.2 Comportamiento en frecuencia de la impedancia del caudín 1	92
Figura B.3 Comportamiento en frecuencia de la impedancia del caudín 2	92
Figura B.4 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de un foco de 100W	93
Figura B.5 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la lámpara fluorescente	93
Figura B.6 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la parrilla	94
Figura B.7 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la línea de 1.6 m en abierto	94
Figura B.8 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la línea de 2 metros en abierto	95
Figura D.1 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de I. C. Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos	102
Figura D.2 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster	103
Figura D.3 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos	104
Figura D.4 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan y T. T. Lie	105
Figura D.5 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Holger Philips (Modelo Eco)	106
Figura D.6 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Holger Philips (Modelo Circuito Resonante Serie)	107

<i>Figura D.7 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Parámetros de Transmisión</i>	108
<i>Figura D.8 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Parámetros de Transmisión para líneas no uniformes</i>	109

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 Trayectoria de la señal propagada de la red examinada de la figura 2.3</i>	25
<i>Tabla 2.2 Resultados de la línea sin bifurcaciones</i>	38
<i>Tabla 2.3 Resultados de la línea con diversas bifurcaciones</i>	43
<i>Tabla 4.1 Comparativo entre los modelos para líneas sin bifurcaciones</i>	63
<i>Tabla 4.2 Comparativo entre los diversos modelos</i>	69
<i>Tabla 4.3 Resultados de comparar las funciones de Transferencia uniformes y no uniformes</i>	75
<i>Tabla 4.4 Resultados de cinco realizaciones del modelo con diferentes longitudes de sección fija</i>	76
<i>Tabla 4.5 Factores de correlación y valores rmse del modelo aproximado con diferentes longitudes de sección</i>	79

INTRODUCCIÓN

¿Qué es la tecnología PLC?

La tecnología PLC (Power Line Communications) consiste en la utilización de la línea eléctrica para la transmisión de datos. Dependiendo del lugar de la red eléctrica en donde esta tecnología es aplicada, las redes PLC se pueden clasificar de la siguiente forma [1]:

- Red PLC de media tensión. Se aplica a las líneas de media tensión desde los transformadores de alta/media hasta los transformadores de media/baja.
- Red PLC de acceso. Entre el transformador de baja tensión y la casa del abonado.
- Red PLC doméstica. Dentro de la casa del abonado.

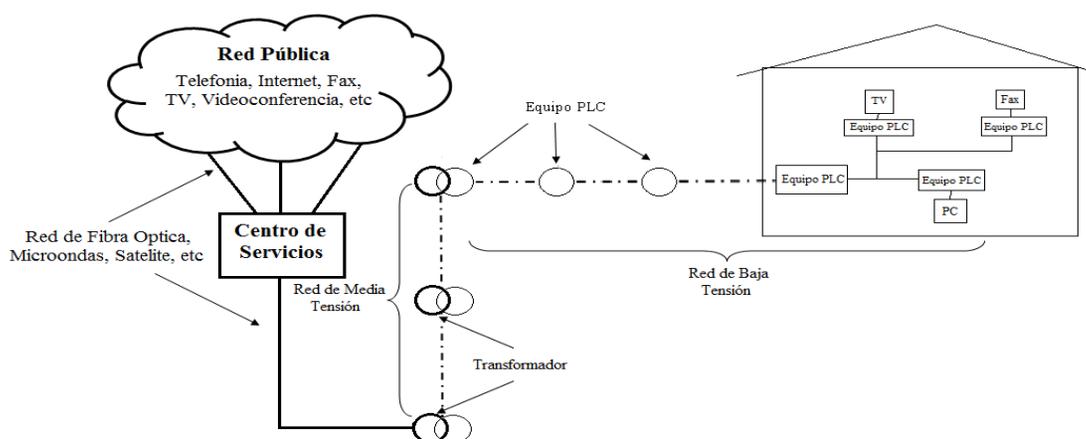


Figura I.1 Diagrama de un sistema PLC

En la figura I.1 se muestra como se conforma un sistema PLC, el lugar en donde se despliegan cada una de las redes PLC y cómo es que este se conecta a la red pública. En el presente trabajo vamos a centrarnos en el estudio del canal de los sistemas PLC domésticos.

Red PLC de media tensión

En este caso la tecnología PLC se aplica a las líneas de media tensión; ya sea solo como transporte de datos, figura I.2, o como parte de un sistema más complejo, figura I.1, para lo cual será necesario de un equipo especial que conectara la red de media tensión con la red de baja tensión o red de acceso, esta red consta de los siguientes elementos:

- Unidad de transmisión. Hace de interfaz entre los servicios de telecomunicaciones externos y la unidad acopladora.
- Unidad acopladora. Conecta la unidad de transmisión al cable de potencia.

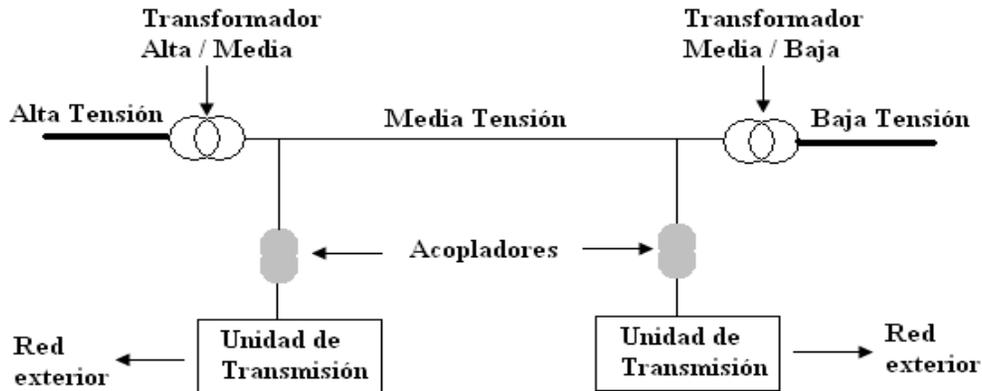


Figura I.2 Red PLC de media tensión utilizada solamente como medio de transporte de datos

Red PLC de acceso

La red PLC de acceso es un sistema full dúplex punto a multipunto con los siguientes elementos, figura I.3:

- Equipo de cabecera. Tiene la función de router y está situado junto al transformador de baja tensión.
- Modem PLC. Es el equipo situado en la casa del abonado. Funciona siempre como esclavo del equipo de cabecera.
- Repetidor PLC. Se emplea en los casos en los que la distancia del abonado al equipo de cabecera es demasiado grande y la señal recibida es pequeña.

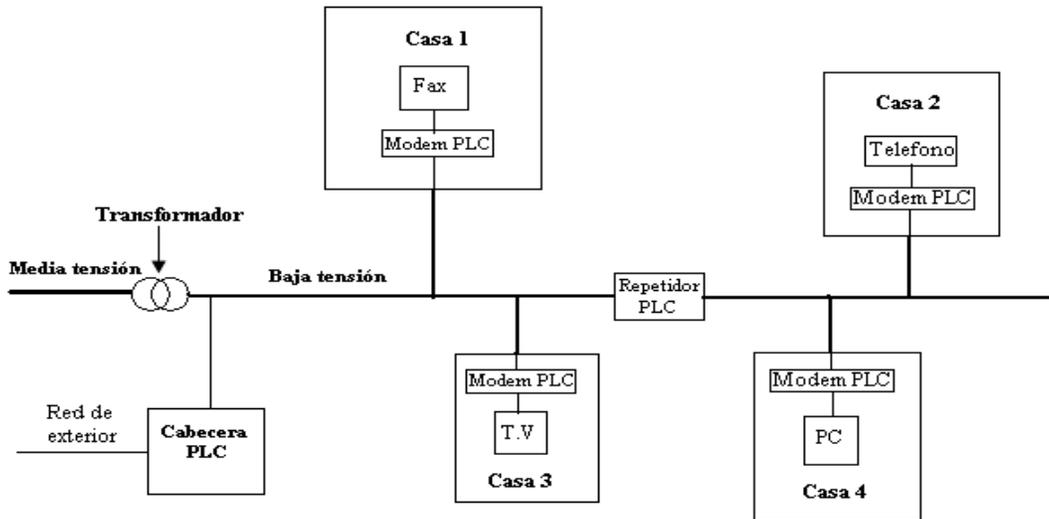


Figura I.3 Esquema de la red PLC de acceso

Red PLC doméstica.

La red PLC domestica consta de los siguientes elementos, figura I.4:

- Pasarela doméstica. Realiza la función de interface entre la red eléctrica de suministro y la red interior.
- Modem PLC. Realiza la función de interface entre los equipos domésticos tales como: PC, impresora, teléfono, TV, etc. y la red eléctrica interior.

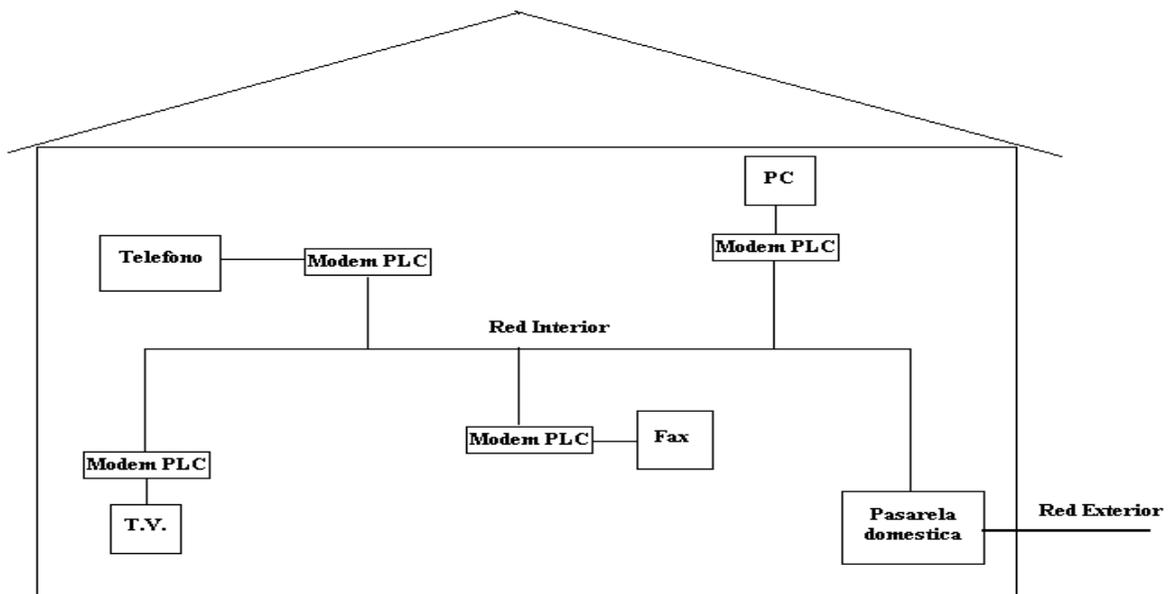


Figura I.4 Esquema de una red PLC domestica

Ventajas y desventajas de PLC

Una de las ventajas más importantes que se tiene con los sistemas PLC es que la instalación eléctrica se convierte en una red de telecomunicaciones al superponer en la misma una señal de radiofrecuencia. Así, cualquier contacto eléctrico de la casa u oficina es suficiente para acceder a la banda ancha y con ello a servicios como la telefonía IP, la transmisión de datos, el video, el Internet y otras aplicaciones, lo cual supone un ahorro muy importante en infraestructura, además de que puede ofrecer servicios de telecomunicaciones en localidades en las que aún no se disponga de estos servicios.

Una de las desventajas del sistema PLC es que la instalación eléctrica no fue diseñada como medio de comunicación de banda ancha y las propiedades inherentes de la red hacen que el canal sea difícil de modelar, y aunque ya se han desarrollado diversos modelos que describen el comportamiento de la red eléctrica como medio de comunicación estos consideran a la red como uniforme (es decir, presentan las mismas características tanto en su geometría como en las propiedades físicas de la línea) lo que en los sistemas domésticos en general, no sucede; la red está constituida de diversas secciones diferentes entre sí.

Además PLC aún se encuentra en vías de desarrollo y a causa de esto faltan estándares que faciliten la interoperabilidad entre productos de distintos fabricantes además de la falta de una normativa EMC (Electro-Magnetic Compatibility), [2-9].

CAPITULO 1

TEORIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

1.1 Introducción

Características importantes del comportamiento de la señal de alta frecuencia (PLC trabaja en el intervalo de 1 a 30 MHz) en la red de energía eléctrica, como: atenuaciones, reflexiones, velocidad y tiempo de propagación, etc., necesarias para poder desarrollar un modelo de análisis del canal PLC, pueden ser descritas por medio de la Teoría de Líneas de Transmisión.

Una Línea de Transmisión se define como un sistema de conductores que se emplea para transmitir entre dos puntos, una señal en forma de energía electromagnética [10]; el método analítico básico en Líneas de Transmisión es la Teoría General de Circuitos.

Para emplear la Teoría General de Circuitos como método de análisis para la línea de transmisión es necesario representar a la línea como una red de parámetros distribuidos uniformemente a lo largo de la línea y no concentrados como en un circuito ordinario; (esto debido a las frecuencias de operación, [11, 12]). Tales parámetros o constantes son: inductancia L , capacitancia C , resistencia R y conductancia G , especificadas todas ellas por unidad de longitud, figura 1.1.

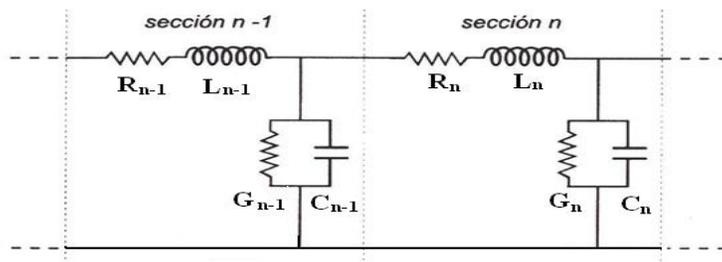


Figura 1.1 Circuito utilizado para analizar una línea de transmisión con parámetros distribuidos

1.2 Obtención de los parámetros L, C, R y G

A continuación se presentan las fórmulas para la obtención de los parámetros L , C , R y G dada una geometría de la línea y frecuencia de operación.

Línea bifilar

En la figura 1.2 se muestra la geometría de una línea bifilar y los parámetros de sus materiales.

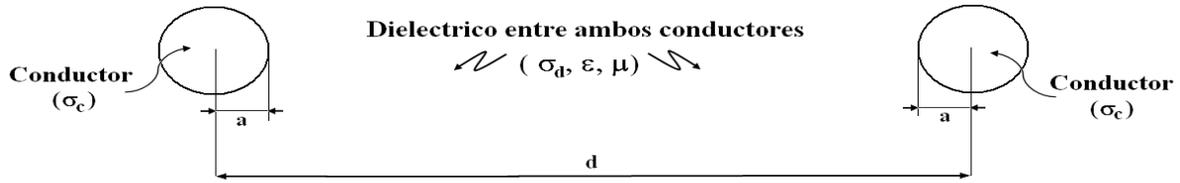


Figura 1.2 Geometría de una línea bifilar

Las fórmulas para obtener los parámetros L , R , C y G de una línea como la de la figura 1.2 son [13-16]:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}(d/2a) \quad [H/m] \quad (1.1)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \quad [F/m] \quad (1.2)$$

$$R = \frac{1}{\pi a l \sigma_c} \quad [\Omega/m] \quad (1.3)$$

$$G = \frac{\pi \sigma_d}{\cosh^{-1}(d/2a)} \quad [S/m] \quad (1.4)$$

dónde:

$$l = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma_c}}; \quad \sigma_d = \tan \delta \cdot \epsilon \cdot \omega; \quad \mu = \mu_r \mu_0; \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

f = frecuencia de operación; $\tan \delta$ = tangente de pérdidas; σ_c = conductividad del conductor; σ_d = conductividad del dieléctrico; μ = permeabilidad efectiva; ϵ = permitividad efectiva.

Línea bifilar dentro de un conduit

En la figura 1.3 se muestra la geometría de una línea bifilar dentro de un conduit.

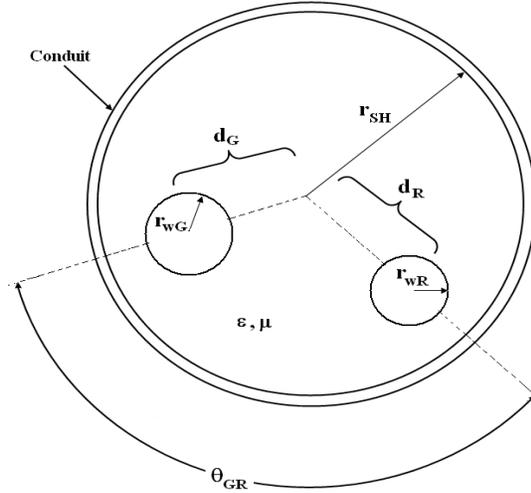


Figura 1.3 Geometría de una línea con dos conductores dentro de un conduit

Los parámetros por unidad de longitud para una geometría como la mostrada en la figura 1.3 están dados en forma matricial de la siguiente forma [17]:

$$R = \begin{bmatrix} r_G + r_0 & r_0 \\ r_0 & r_R + r_0 \end{bmatrix} \quad [\Omega/m] \quad (1.5)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_G & l_m \\ l_m & l_R \end{bmatrix} \quad [H/m] \quad (1.6)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_G + g_m & -g_m \\ -g_m & g_R + g_m \end{bmatrix} \quad [S/m] \quad (1.7)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_G + c_m & -c_m \\ -c_m & c_R + c_m \end{bmatrix} \quad [F/m] \quad (1.8)$$

El significado de cada uno de estos parámetros que componen las matrices se ve más claramente en la figura 1.4 donde se muestran los parámetros L , C , R y G por unidad de longitud en un circuito equivalente de una línea de transmisión con tres conductores.

Los parámetros de inductancia, l_G , l_R y l_m están en función de la geometría de la línea dentro del conduit, figura 1.3, vienen dados por las siguientes expresiones:

$$l_G = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{SH}^2 - d_G^2}{r_{SH} r_{wG}} \right) \quad (1.9)$$

$$l_R = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{SH}^2 - d_R^2}{r_{SH} r_{wR}} \right) \quad (1.10)$$

$$l_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{d_R}{r_{SH}} \sqrt{\frac{(d_G d_R)^2 + r_{SH}^4 - 2d_G d_R r_{SH}^2 \cos \theta_{GR}}{(d_G d_R)^2 + d_R^4 - 2d_G d_R^3 \cos \theta_{GR}}} \right] \quad (1.11)$$

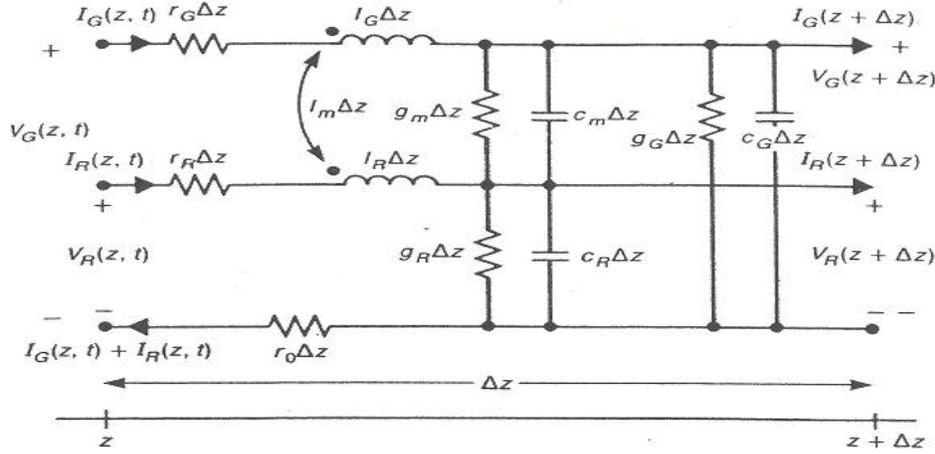


Figura 1.4 Circuito equivalente de parámetros por unidad de longitud para una línea de transmisión con dos conductores dentro de un conduit [17].

Las relaciones para determinar C son las siguientes:

$$\mathbf{C} = \mu\epsilon\mathbf{L}^{-1} \quad (1.12)$$

$$\begin{bmatrix} c_G + c_m & -c_m \\ -c_m & c_R + c_m \end{bmatrix} = \frac{\mu\epsilon}{(l_G l_R - l_m^2)} \begin{bmatrix} l_R & -l_m \\ -l_m & l_G \end{bmatrix}$$

$$c_m = \frac{\mu\epsilon l_m}{(l_G l_R - l_m^2)}; \quad c_G + c_m = \frac{\mu\epsilon l_R}{(l_G l_R - l_m^2)}; \quad c_R + c_m = \frac{\mu\epsilon l_G}{(l_G l_R - l_m^2)};$$

Similarmente es posible calcular G , para expresar la matriz de conductancia por unidad de longitud por medio de la siguiente relación:

$$\mathbf{G} = \mu \sigma_d \mathbf{L}^{-1} \quad (1.13)$$

y la resistencia para un conductor de radio r_x viene dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{1}{2r_x} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \sigma_c}} \sqrt{f} \quad (1.14)$$

Línea de tres conductores dentro de un conduit

La figura 1.5 muestra la geometría de una línea con tres conductores dentro de un conduit

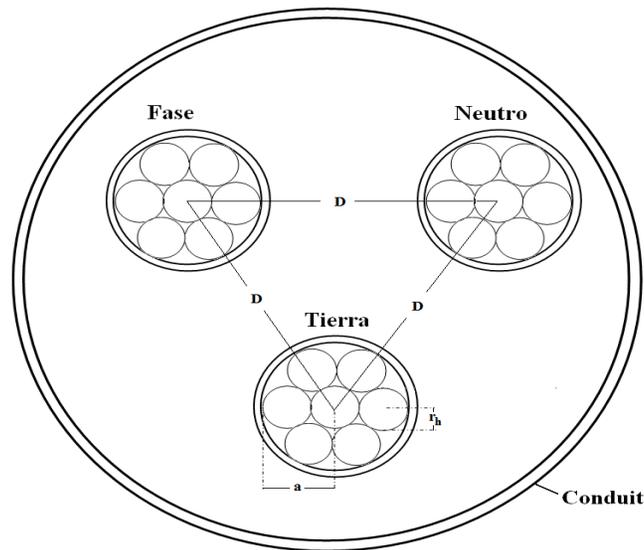


Figura 1.5 Geometría de la línea con tres conductores dentro de un conduit

El parámetro de resistencia por unidad de longitud para una línea como la mostrada en la figura 1.5, está dada por [18]:

$$R = X_R \cdot R_S \quad [\Omega/m] \quad (1.15)$$

en donde R_S es la resistencia para un conductor sólido, la cual se obtiene mediante [13]:

$$R_S = \frac{1}{\pi a \delta \sigma_c} \quad [\Omega/m] \quad (1.16)$$

y X_R es un factor de corrección que debe ser multiplicado a la resistencia del conductor solido si el cable conductor está constituido por varios hilos, dado por la siguiente expresión [12]:

$$X_R = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{r_h - \delta}{r_h}\right) \cdot r_h^2 - (r_h - \delta)\sqrt{r_h^2 - (r_w - \delta)^2}}{2r_h \delta} \quad (1.17)$$

donde a es el radio del conductor, r_h es el radio del hilo conductor y δ es la profundidad de penetración de la corriente debida al efecto pelicular que se calcula con la siguiente expresión [13]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_c \sigma_c}}$$

La inductancia total del arreglo de tres conductores, figura 1.5 se obtiene mediante [18]:

$$L = \frac{\mu_c}{\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D-a}{a}\right) \right] [H/m] \quad (1.18)$$

donde D es la distancia entre los conductores.

El cálculo de la capacitancia es más laborioso debido a la presencia del cable de tierra dentro del conduit ya que los efectos de acoplamiento capacitivo del conduit y la tierra no pueden ser ignorados. Estos efectos de acoplamiento son considerados como capacitancias equivalentes, como se muestra en la figura 1.6

La capacitancia de cable a cable por unidad de longitud está dada por:

$$C_{cable} = \frac{\pi \epsilon}{\ln\left[\left(\frac{D}{2a}\right) + \sqrt{\left(\frac{D}{2a}\right)^2 - 1}\right]} [F/m] \quad (1.19)$$

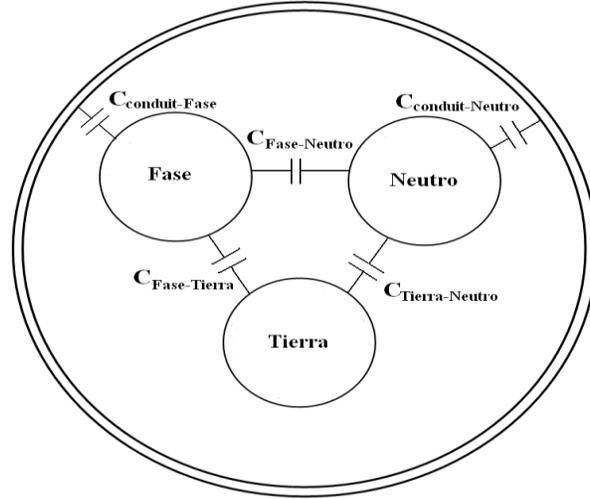


Figura 1.6 Diagrama de capacitancia equivalente en la línea

La fórmula anterior solo es aplicable si las distancias entre conductores es uniforme, cuando estas distancias no lo son, se tendrán diferentes valores de capacitancias entre los conductores, las cuales pueden ser calculadas mediante las siguientes formulas [18]:

$$C_{F-N} = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left[\left(\frac{D_{F-N}}{2a} \right) + \sqrt{\left(\frac{D_{F-N}}{2a} \right)^2 - 1} \right]} \quad (1.19a)$$

$$C_{F-T} = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left[\left(\frac{D_{F-T}}{2a} \right) + \sqrt{\left(\frac{D_{F-T}}{2a} \right)^2 - 1} \right]} \quad (1.19b)$$

$$C_{N-T} = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left[\left(\frac{D_{N-T}}{2a} \right) + \sqrt{\left(\frac{D_{N-T}}{2a} \right)^2 - 1} \right]} \quad (1.19c)$$

donde C_{F-N} , C_{F-T} , C_{N-T} , son las capacitancias entre fase y neutro, fase y tierra y neutro y tierra, respectivamente, y D_{F-N} , D_{F-T} , D_{N-T} , son las distancias entre fase y neutro, fase y tierra, y neutro y tierra. Lo mismo sucede en (1.18), D no es igual y debe de adecuarse [18].

La determinación de la capacitancia entre los conductores y el conduit es más complicada ya que el conductor y el conduit están en una posición coaxial excéntrica.

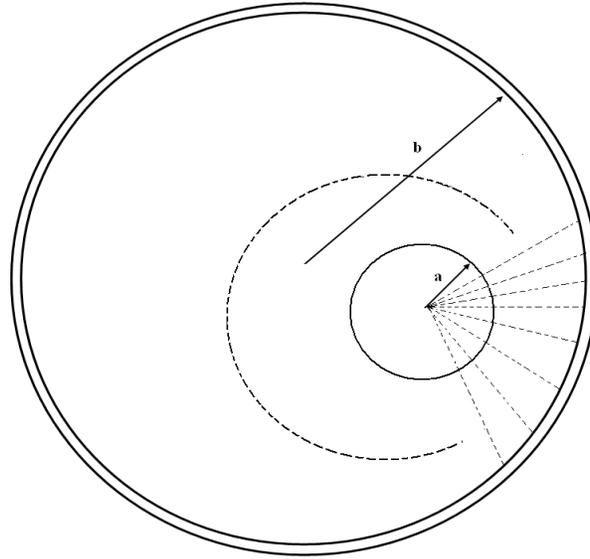


Figura 1.7 Segmentación de la excentricidad de los conductores cilíndricos coaxiales

La capacitancia para un conductor cilíndrico coaxial está dada por [13-16]:

$$C_{coaxial} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [F/m] \quad (1.20)$$

donde b es el radio interno del conductor externo. Tomando en cuenta la excentricidad del conductor para este caso, de la figura 1.17 se toma el centro del conductor interior como el origen, los ejes radiales son usados para segmentar los conductores centrales excéntricos en N sectores, como se muestra en la figura 1.7. Cuando $N \rightarrow \infty$, cada sector puede ser aproximado como un segmento en conductores cilíndricos coaxiales, por lo que la capacitancia entre los cables conductores y el conduit, como se muestra en la figura 1.6, puede ser tomada como la capacitancia promedio de todos los segmentos mostrados en la figura 1.7 y estará dada por [18]:

$$C_{conduit} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \cdot \frac{2\pi\epsilon_k}{\ln\left(\frac{b_k}{a}\right)} \quad [F/m] \quad (1.21)$$

donde ϵ_k y b_k son la permitividad del material dieléctrico y el radio interno del conduit para el sector k .

Considerando la figura 1.6, las señales están acopladas entre todos los elementos de la línea de transmisión a través de sus capacitancias mutuas. La capacitancia total es la que se muestra en la figura 1.8, la capacitancia entre el conduit y Tierra no se toma en cuenta debido a que ambos generalmente están conectados a Tierra.

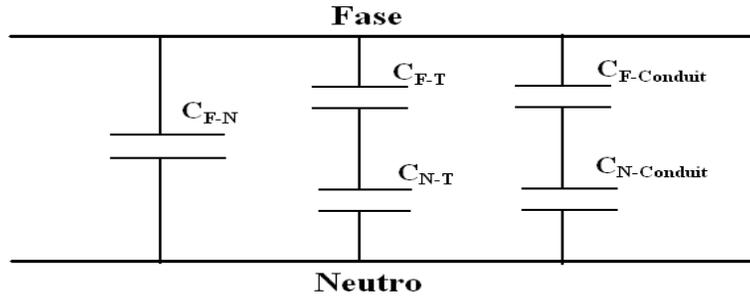


Figura 1.8 Capacitancia entre dos pares de cables, Fase y Neutro

La conexión en serie de dos capacitancias entre conductores (C_{F-T} , C_{N-T}) representa el acoplamiento introducido por el cable de Tierra mientras que la conexión en serie de dos capacitancias entre conductores y el conduit representa el acoplamiento introducido por el conduit. La capacitancia total es:

$$C = C_{F-N} + \left(\frac{C_{F-T} \cdot C_{N-T}}{C_{F-T} + C_{N-T}} \right) + \left(\frac{C_{F-Conduit} \cdot C_{N-Conduit}}{C_{F-Conduit} + C_{N-Conduit}} \right) \quad (1.22)$$

Si el medio es homogéneo, la siguiente ecuación se mantiene:

$$\frac{C}{G} = \frac{\varepsilon}{\sigma_d} \Rightarrow G = \frac{\sigma_d C}{\varepsilon} \quad [S/m] \quad (1.23)$$

En donde G es la conductancia del cable.

1.3 Ecuación general de una línea de transmisión

Conocidos los cuatro parámetros básicos de una línea (L , C , R y G) es posible determinar la relación que existe entre las ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de ella, desde el generador hacia la carga, así como la velocidad con la que lo hacen, las ecuaciones que describen este comportamiento son las siguientes [10, 11, 13-16]:

$$V(z) = Ae^{-\gamma z} + Be^{+\gamma z} \quad (1.24)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} [Ae^{-\gamma z} - Be^{+\gamma z}] \quad (1.25)$$

En donde A y B son constantes por definir, a γ se le da el nombre de constante de propagación y está definida por la ecuación:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.26)$$

La constante de propagación es un número complejo y también se puede expresar como:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.27)$$

En donde α indica el factor de atenuación que sufre la onda de voltaje, o de corriente según sea el caso, conforme esta viaja o se propaga a lo largo de la línea; y β indica el factor del cambio de fase de la onda conforme se propaga, $\omega = 2\pi f$; mientras que a Z_0 se le da el nombre de impedancia característica de la línea y está dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad [\Omega] \quad (1.28)$$

Otros dos parámetros importantes, que dan información adicional del cómo funciona la línea son: la velocidad de fase y el tiempo de retardo de la línea y vienen dados por (1.29) y (1.30) respectivamente:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} \quad [m/s] \quad (1.29)$$

$$t_d = \frac{l}{v_p} = \frac{\beta l}{\omega} \quad [s] \quad (1.30)$$

1.4 Propagación en la línea

Si se considera una línea de longitud infinita, como se muestra en la figura 1.9, por la que viaja una onda de voltaje, dada por el primer término de la ecuación (1.24):

$$V(z) = Ae^{-\gamma z}$$

A esta onda de voltaje que parte del generador hacia una carga situada en el otro extremo de la línea se le da el nombre de incidente, como en este caso la línea es infinita, la onda nunca alcanzará la carga y las condiciones para una posible onda reflejada jamás se darán, es por eso que el segundo término de la ecuación (1.24) no aparece en este caso.

El voltaje y la corriente de la onda incidente pueden escribirse como:

$$V(z) = Ae^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad e \quad I(z) = \frac{1}{Z_0} [Ae^{-\alpha z} e^{-j\beta z}]$$

Se observa que, independientemente de la atenuación de la línea, el cociente del voltaje sobre la corriente siempre es igual a Z_0 . Este resultado es el mismo para todos los puntos de la línea, o sea que es independiente de z , por lo que se puede decir que la onda incidente “ve” hacia la derecha una impedancia igual a Z_0 . Entonces si al final de una línea finita de impedancia característica Z_0 se conecta una carga con impedancia igual a Z_0 , la línea se comportará igual a como si fuese infinita, en el sentido de que no habrá una onda reflejada.

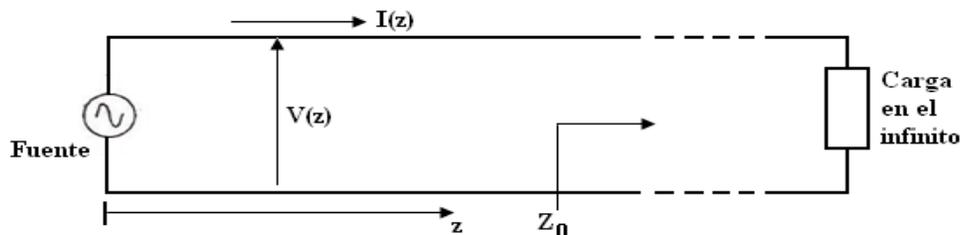


Figura 1.9 Línea de longitud infinita.

En conclusión, una línea de longitud finita que esté terminada con una carga igual a su impedancia característica le entregará toda la potencia incidente disponible a la carga. Cuando esto ocurre se dice que la línea está acoplada, figura 1.10.

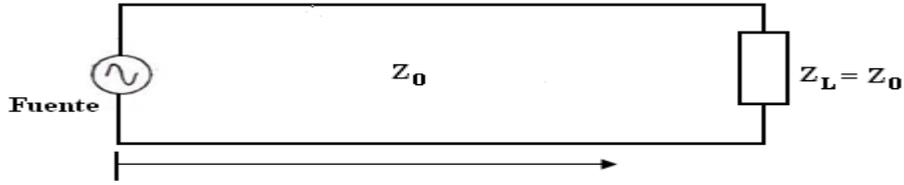


Figura 1.10 Línea finita acoplada

Sin embargo, si la impedancia característica, Z_0 , y la impedancia de carga, Z_L , son diferentes, la línea ya no se comportará como si fuese infinita; estará desacoplada y habrá una onda reflejada, figura 1.11.

La onda total de voltaje en una línea desacoplada estará dada por la superposición, para toda z , de la onda incidente y la onda reflejada, tal como lo expresa la solución general dada por la ecuación (1.24):

$$V(z) = \underbrace{Ae^{-\gamma z}}_{\text{ondaincidente}} + \underbrace{Be^{+\gamma z}}_{\text{ondareflejada}}$$

Igualmente, para la corriente total se tendrá la expresión (1.25):

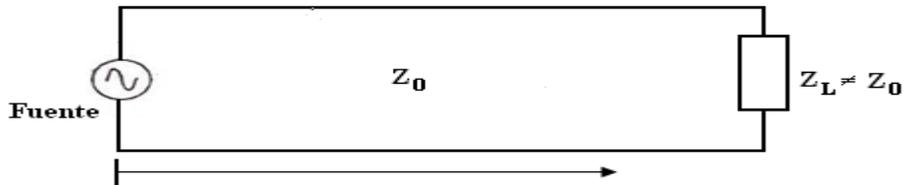


Figura 1.11 Línea finita desacoplada.

1.5 Impedancia de entrada de una línea de transmisión

Si se considera una línea finita de longitud l , como la de la figura 1.12, $z = 0$ es el punto donde se encuentra la carga y $z = -l$ es el punto donde se encuentra el generador. Las ecuaciones que describen el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente son las mismas que (1.24) y (1.25). Por lo tanto, la impedancia vista hacia la derecha desde cualquier punto en la línea está dada por:

$$Z(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{Ae^{-\gamma z} + Be^{\gamma z}}{Ae^{-\gamma z} - Be^{\gamma z}} \quad (1.31)$$

Si $z = -l$, la impedancia de entrada Z_i vista por el generador hacia la derecha, será entonces:

$$Z_i = Z_0 \frac{Ae^{\gamma l} + Be^{-\gamma l}}{Ae^{\gamma l} - Be^{-\gamma l}} \quad (1.32)$$

En $z = 0$, donde está la carga Z_L , de (1.29) se obtiene:

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)} = Z_0 \frac{A+B}{A-B} = Z_0 \frac{1+B/A}{1-B/A}$$

$$Z_L - \frac{B}{A}Z_L = Z_0 + \frac{B}{A}Z_0$$

de donde:

$$\frac{B}{A} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \rho \quad (1.33)$$

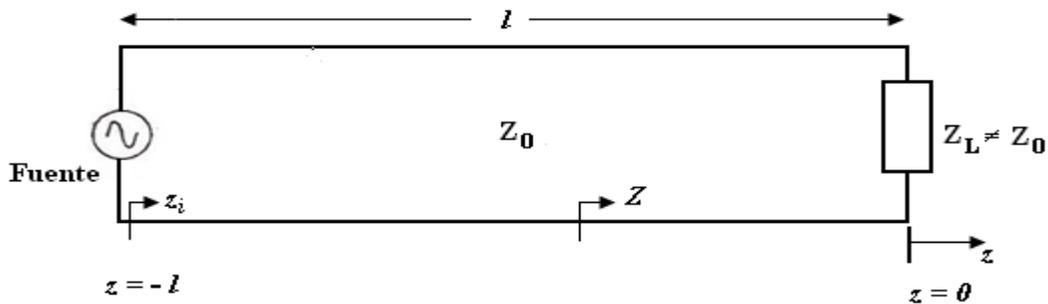


Figura 1.12 Línea de longitud l terminada con una carga arbitraria en $z = 0$.

Al cociente B/A se le da el nombre de coeficiente de reflexión en el punto de carga. Se designa por la letra ρ y generalmente es una cantidad compleja. Si el numerador y el denominador de (1.29) se dividen entre $Ae^{\gamma l}$, se tiene:

$$Z_i = Z_0 \frac{1 + (B/A)e^{-2\gamma l}}{1 - (B/A)e^{-2\gamma l}}$$

y como $B/A = \rho$:

$$Z_i = Z_0 \frac{1 + \rho e^{-2\gamma l}}{1 - \rho e^{-2\gamma l}} \quad (1.34)$$

Esta ecuación permite calcular la impedancia de entrada de la línea si se conocen su longitud l , su impedancia característica Z_0 , la constante de propagación γ y el coeficiente de reflexión ρ en el punto en donde está la carga. Otra ecuación alternativa, en función de la impedancia de carga en lugar del coeficiente de reflexión, la cual se puede obtener mediante algebra y uso de identidades trigonométricas, queda como:

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l} \quad (1.35)$$

Las ecuaciones (1.34) y (1.35) dan el mismo resultado y se utilizan indistintamente, de acuerdo a los datos que se conozcan.

Línea terminada en corto circuito

Se considerará ahora una línea en cuyo extremo final se tiene un corto circuito, figura 1.13. Al evaluar la ecuación (1.24) en la carga, donde $z = 0$, y dado que el voltaje en ese punto es cero, se obtiene:

$$V(0) = A + B = 0 \Rightarrow B = -A \quad \therefore \rho = -1$$

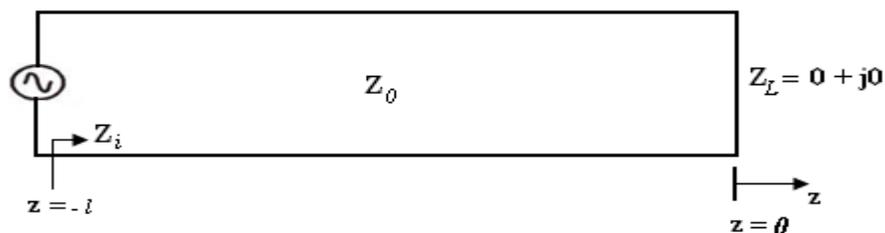


Figura 1.13 Línea terminada en corto

Línea terminada en circuito abierto

El desarrollo a seguir para analizar una línea terminada en circuito abierto, figura 1.14, es similar al de la sección anterior. Para un circuito abierto al final de la línea se tendrá una corriente igual a cero. Por lo tanto a partir de la ecuación (1.25) se puede expresar:

$$I(0) = (1/Z_0)(A - B) = 0 \Rightarrow A = B \quad \therefore \rho = 1$$

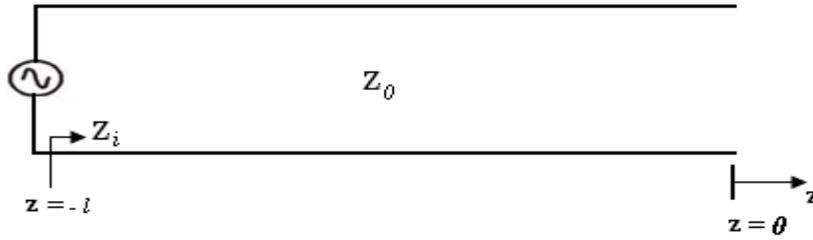


Figura 1.14 Línea terminada en circuito abierto.

1.6 La Matriz de Transmisión

Una Línea de Transmisión puede ser considerada como una red de dos puertos, figura 1.16, y cuando se evalúan los voltajes y corrientes que describen el comportamiento de la línea dados por (1.24) y (1.25) en ambos extremos de red se obtendrá [10,13]:

$$V_2 = V(0) = A + B \quad (1.24a)$$

$$I_2 = I(0) = \frac{1}{Z_0}(A - B) \quad (1.25a)$$

$$V_1 = V(-l) = Ae^{\gamma l} + Be^{-\gamma l} \quad (1.24b)$$

$$I_1 = I(-l) = \frac{1}{Z_0}(Ae^{\gamma l} - Be^{-\gamma l}) \quad (1.25b)$$

Estas cuatro expresiones se pueden manipular algebraicamente con el fin de obtener expresiones matemáticas para las variables de entrada en función de las variables de salida, o viceversa. De las primeras dos ecuaciones se tiene que:

$$A = V_2 - B \Rightarrow I_2 = \frac{1}{Z_0}(V_2 - B - B)$$

$$\Rightarrow B = \frac{1}{2}(V_2 - I_2 Z_0)$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{2}(V_2 + I_2 Z_0)$$

Al sustituir los valores encontrados de A y B en las ecuaciones (1.24b) y (1.25b), se obtiene:

$$V_1 = \left[\frac{1}{2}V_2 + \frac{1}{2}I_2Z_0 \right] e^{\gamma l} + \left[\frac{1}{2}V_2 - \frac{1}{2}I_2Z_0 \right] e^{-\gamma l}$$

$$V_1 = V_2 \cosh \gamma l + I_2 Z_0 \sinh \gamma l \quad (1.36)$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_0} \left[\frac{1}{2}V_2 + \frac{1}{2}I_2Z_0 \right] e^{\gamma l} - \frac{1}{Z_0} \left[\frac{1}{2}V_2 - \frac{1}{2}I_2Z_0 \right] e^{-\gamma l}$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_0} V_2 \sinh \gamma l + I_2 \cosh \gamma l \quad (1.37)$$

Las ecuaciones (1.36) y (1.37) pueden escribirse de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.38)$$



Figura 1.15 La línea considerada como una red de dos puertos.

CAPITULO 2

MODELOS DE ANALISIS DEL CANAL PLC UNIFORME

2.1 Introducción

Las redes de energía eléctrica de baja tensión usadas como medio de comunicación difieren considerablemente en topología, estructura y propiedades físicas de otros medios convencionales como son el par trenzado, el coaxial y la fibra óptica. El comportamiento de la señal en el canal PLC depende de varios factores importantes tales como las propiedades y geometría de los cables que constituyen la red eléctrica, la topología, las cargas conectadas entre otros; los efectos que todas estas características, propias del canal, traen consigo se muestran principalmente como desacoplamientos y reflexiones de la señal en cada punto de bifurcación y no uniformidad de la línea. Debido a estas propiedades de la línea eléctrica las características del canal son dependientes del tiempo, frecuencia y localización del transmisor/receptor en la infraestructura específica de la línea eléctrica. Por lo tanto el canal PLC puede ser descrito como un canal aleatorio variante en el tiempo, teniendo una importante dependencia en la frecuencia.

Aunque inicialmente fue diseñado solamente para distribuir energía eléctrica en 60 Hz y 50 Hz, se han desarrollado una serie de modelos de análisis que intentan describir las características de la red de energía eléctrica como un canal de comunicaciones [18-25], y que consideran todas las propiedades propias de la línea descritas anteriormente para caracterizar el canal por medio de la Función de Transferencia, $H(f)$.

A continuación se resumen, comparan y evalúan de manera muy breve estos modelos desarrollados para la obtención de la Función de Transferencia del canal PLC, los cuales hemos clasificado cómo:

- Modelos para la línea sin bifurcaciones
- Modelos para la línea con bifurcaciones

2.2 Modelos para la línea sin bifurcaciones

Modelo de I.C Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos [19]

El primer modelo presentado es el desarrollado por I. C. Papaleonidopoulos en donde la red eléctrica se considera como una Línea de Transmisión uniforme de longitud l e impedancia característica Z_0 , en cuyo extremo final, ($z = l$), se tiene una impedancia de carga Z_L y en el extremo inicial ($z = 0$) se encuentra un generador con una impedancia propia Z_g , figura 2.1. Sabemos bien que una Función de Transferencia es la relación en estado estacionario del voltaje que se encuentra a la salida con respecto al que tenemos en la entrada, y para este caso estos voltajes se encuentran relacionados como sigue:

$$H(f) = \frac{V(l)}{V(0)} = \frac{e^{-al} e^{-j\beta l} (1 + \rho_L)}{1 + \rho_L e^{-2al} e^{-j2\beta l}} \quad (2.1)$$

En donde a es el factor de atenuación, β es el factor de cambio de fase; ambos se obtienen a partir de la constante de propagación γ de la línea, (1.27), ρ_L es el coeficiente de reflexión en el punto $z = l$, (1.33), y $H(f)$ es la función de transferencia de la línea o en este caso de la red eléctrica.

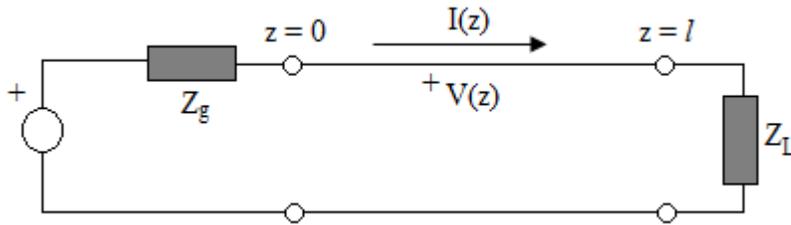


Figura 2.1 Línea de transmisión [21]

A partir de la ecuación (2.1) se obtiene la respuesta en amplitud de la línea mediante la siguiente expresión:

$$|H(f)| = \frac{e^{-al} (1 + \rho_L)}{\sqrt{(1 + \rho_L e^{-2al} \cos 2\beta l)^2 + (\rho_L e^{-2al} \sin 2\beta l)^2}} \quad (2.2)$$

Modelo de parámetros de Transmisión (sin bifurcaciones)

Una línea puede modelarse como una Red de Dos Puertos (*R2P*) mediante la Matriz de Transmisión, o matriz *ABCD* y las ecuaciones que describen el comportamiento de esta vienen dadas por las expresiones, deducidas anteriormente (1.36) y (1.37), las cuales fueron escritas de forma matricial de la siguiente forma (1.38):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

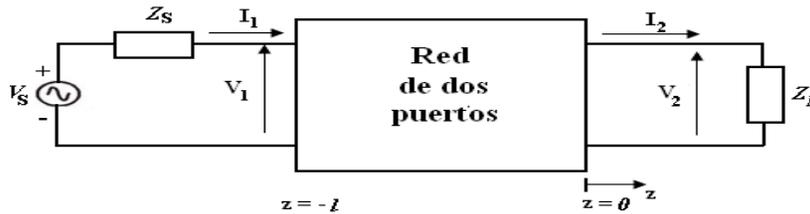


Figura 1.15 La línea representada como una red de dos puertos.

Dada una *R2P* como la que se mostró en la figura 1.15 a partir de (1.38) es posible determinar la matriz y los parámetros de Transmisión *ABCD* como sigue:

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh \gamma l \\ B &= Z_0 \sinh \gamma l \\ C &= \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l \end{aligned} \quad (2.3)$$

Por lo que es posible reescribir (1.38) y obtener la Matriz de Transmisión *T*:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

De la figura 1.15, usando el modelo de una *R2P* es posible calcular la función de transferencia $H = V_L/V_S$. Haciendo uso de (2.3) podemos redefinir las ecuaciones (1.36) y (1.37) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 + BI_2 \\ I_1 &= CV_2 + DI_2 \end{aligned}$$

Además del circuito de la figura 1.15, tenemos las siguientes expresiones:

$$V_S = V_1 + I_1 Z_S; \quad V_L = V_2 = I_2 Z_L$$

Por lo tanto, a partir de las cuatro expresiones anteriores podemos obtener la función de transferencia de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} H &= \frac{V_L}{V_S} = \frac{I_2 Z_L}{V_1 + I_1 Z_S} = \frac{I_2 Z_L}{(AV_2 + BI_2) + (CV_2 + DI_2)Z_S} = \frac{I_2 Z_L}{(AI_2 Z_L + BI_2) + Z_S (CI_2 Z_L + DI_2)} \\ &= \frac{I_2 Z_L}{(AI_2 Z_L + BI_2) + (CI_2 Z_S Z_L + DI_2 Z_S)} = \frac{I_2 Z_L}{I_2 (AZ_L + B + CZ_S Z_L + DZ_S)} \\ H &= \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_S Z_L + DZ_S} \end{aligned} \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) es la expresión para el cálculo de la Función de Transferencia en función de los parámetros de transmisión $ABCD$ en una línea uniforme sin bifurcaciones, [19, 20].

Estos modelos presentan una Función de Transferencia en términos conocidos y fáciles de obtener, pero tienen la desventaja de que no consideran las bifurcaciones que toda red de energía eléctrica tiene aunque el modelo de parámetros T si es posible usarlo en una red con bifurcaciones e incluso aplicarlo para una red eléctrica no uniforme, pero esto último se tratará más a fondo en el siguiente capítulo ya que forma parte esencial del presente trabajo.

2.3 Modelos para la línea con bifurcaciones

Dentro de los modelos de análisis para líneas con bifurcaciones (cargas conectadas a la red eléctrica) podemos hacer dos divisiones en función de cómo es expresada la Función de Transferencia de la red:

- Modelos de la línea con multitrayectorias.
- Modelos de la línea con N elementos en cascada.

Modelos de la línea con multitrayectorias

Para entender de mejor manera el concepto de multitrayectorias se presenta una red con una ramificación, figura 2.2, en donde el enlace consiste de los segmentos (1), (2) y (3) con longitudes l_1 , l_2 y l_3 y las impedancias características Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L3} respectivamente.

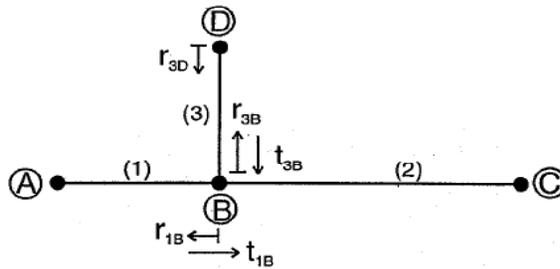


Figura 2.2 Cable con una rama (bifurcación) [22]

A partir de la figura 2.2 se deduce la tabla 2.1 la cual presenta las trayectorias que se podrían llegar a tener así como la longitud de estas, también se deducen los coeficientes de reflexión y transmisión que intervendrán en cada trayectoria.

No. De Trayectoria	Trayectoria de la Señal	Factor de peso, g_i	Longitud de la Trayectoria
1	A→B→C	t_{1B}	$l_1 + l_2$
2	A→B→D→B→C	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot t_{3B}$	$l_1 + 2 \cdot l_3 + l_2$
:	:	:	:
N	A→B(→D→B) ^{N-1} →C	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot (r_{3B} \cdot r_{3D})^{(N-2)} \cdot t_{3B}$	$l_1 + 2(N-1) \cdot l_3 + l_2$

Tabla 2.1 Trayectoria de la señal propagada de la red examinada de la figura 2.3 [22]

En los modelos de la línea con multitrayectorias la señal que se tiene en el punto de recepción es modelada como una suma de infinitas réplicas de la señal transmitida inicialmente, las cuales difieren en amplitud y fase; donde cada componente (replica) en esta suma representa el resultado de propagación a través de una trayectoria en particular. Aunque se tiene que tener presente que en estos modelos es posible delimitar el efecto de las infinitas trayectorias en un número finito de trayectorias significantes ya que mientras la longitud de esta aumenta el nivel de atenuación se incrementa, y por lo tanto, la contribución de la trayectoria en la señal recibida decrece. El análisis de la señal propagada

en redes más complicadas, con más bifurcaciones, se puede realizar particionado la red en trayectorias similares a la descrita anteriormente en la figura 2.2 y tabla 2.1.

De los modelos tratados en este trabajo los que expresan la Función de Transferencia de esta forma son:

- Modelo de Manfred Zimmermann
- Modelo de Despina Anastasiadou
- Modelo de Holger Philipps (Eco)

Modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster [22]

En el análisis propuesto por M. Zimmermann se propone modelar la Función de Transferencia de un canal típico PLC mediante la siguiente expresión:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Factor de ponderación}} \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i}}_{\text{término de atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}}}_{\text{término de retardo}} \quad (2.6)$$

dónde:

i = Numero de trayectoria, la trayectoria con el retraso más corto tiene el índice $i = 1$

a_0, a_1 = Parámetros de atenuación.

k = exponente del factor de atenuación (sus valores usuales están entre 0.2 y 1)

g_i = Factor de peso para la trayectoria i ,

d_i = longitud de la trayectoria i

τ_i = retraso de la trayectoria i

El factor de ponderación en (2.6) se refiere al producto de los coeficientes de transmisión y reflexión a través de la i -ésima trayectoria de propagación de la figura 2.2, la cual puede entenderse mejor mediante la tabla 2.1. Para simplificar el cálculo el modelo considera que A y C están acoplados, lo cual significa $Z_A=Z_{L1}$ y $Z_C=Z_{L2}$, aunque en la realidad esto no es cierto por lo que se debe de tomar estos puntos de reflexión en los cálculos teóricos ya que $Z_A = Z_C = 50 \Omega$. A partir de la figura 2.2 los puntos para reflexión que toma en

consideración este modelo son (B) y (D) y sus coeficientes de reflexión calculados por medio de (1.33) quedan de la siguiente forma:

$$r_{1B} = \frac{(Z_{L2} \| Z_{L3}) - Z_{L1}}{(Z_{L2} \| Z_{L3}) + Z_{L1}} ; \quad r_{3D} = \frac{Z_D - Z_{L1}}{Z_D + Z_{L1}} ; \quad r_{3B} = \frac{(Z_{L2} \| Z_{L1}) - Z_{L3}}{(Z_{L2} \| Z_{L1}) + Z_{L3}}$$

y los coeficientes de transmisión estarán expresados por:

$$t_{1B} = 1 - |r_{1B}| \qquad t_{3B} = 1 - |r_{3B}|$$

Otro factor importante que está considerado en (2.6) es el término de atenuación o pérdidas en los cables que son causadas por la frecuencia y la longitud de la trayectoria. Este modelo basado en extensivas mediciones de respuestas en frecuencia muestra que la parte real de la constante de propagación puede ser descrita como [22]:

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \qquad (2.7)$$

Otro factor considerado en este modelo es el término de retraso o tiempo de propagación de la i-esima trayectoria, el cual puede llegar a ser calculado mediante (1.29) y (1.30).

Modelo Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos [23]

En este modelo se deduce la Función de Transferencia del canal por medio de la transmisión de un impulso $\delta(t)$ a través del ambiente de multitrayectorias el cual produce en la recepción un tren de impulsos retrasados. La respuesta al impulso del canal puede ser calculada como la suma de todas las componentes de acuerdo a:

$$h(\tau_d, t) = \sum_{i=1}^L \{ r_i e^{j\theta_i} \cdot e^{-\alpha l_i} \cdot \delta(t - \tau_{di}) \} \qquad (2.8)$$

En donde $r_i e^{j\theta_i}$ es el factor de reflexión total de la i-esima trayectoria (factor de peso en el modelo de Zimmermann) el cual consiste de M, no necesariamente diferentes, discontinuidades (causadas por las bifurcaciones en la línea) y viene dado por:

$$r_i e^{j\theta_i} = \prod_{k=1}^{M_1} \{\rho_{ik}\} \prod_{n=1}^{M_2} \{\tau_{in}\} \quad \text{donde } M_1 + M_2 = M \quad (2.9)$$

Los factores de reflexión ρ_{ik} son calculados mediante (1.33) y los factores de transmisión τ_{in} se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$\tau = 1 + \rho = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (2.10)$$

El factor $e^{-\alpha l_i}$ corresponde a la atenuación que sufre la señal en la trayectoria i la cual tiene una longitud l , y $\delta(t - \tau_{di})$ representa el tiempo de retardo de la trayectoria i .

Realizando una transformación de (2.8) al dominio de la frecuencia se obtiene:

$$H(f) = \sum_{i=L}^L \{r_i e^{j\theta_i} \cdot e^{-\alpha l_i} \cdot e^{-j\omega \tau_{di}}\}$$

Tomando en consideración (1.27) y (1.30) la función de respuesta en frecuencia queda expresada por:

$$H(f) = \sum_{i=1}^L \{r_i e^{j\theta_i} \cdot e^{-\gamma l_i}\} \quad (2.11)$$

La expresión anterior es una relación del voltaje de salida (V_{rx}) en el dominio de la frecuencia y el voltaje que se inyecta a la línea (V_{in}) del generador ($Z_g = 0$). En el caso de una red de energía eléctrica, como la de la figura 2.3, el cálculo de la función de transferencia entre cualquiera de los dos dispositivos de comunicación involucra un factor adicional, el cual incluye las características no ideales del sistema de transmisión (estas condiciones se refieren a que no existe acoplamiento entre la fuente y la línea), este factor es la suma del voltaje de entrada de la fuente (V_S) a él voltaje medido en la terminal de transmisión (V_{tx}), el cual comprende la señal inyectada y la suma de todas las componentes de la señales reflejadas hacia la fuente. El cálculo del factor anterior se realiza aplicando las leyes de Kirchhoff, por lo que la Función de Transferencia del canal queda como:

$$T(f) = \frac{V_{rx}}{V_{tx}} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} \cdot \frac{Z_{in} + Z_g}{Z_{in}} \cdot \sum_{i=1}^L \{ r_i e^{j\theta_i} \cdot e^{-\gamma l_i} \} \quad (2.12)$$

donde Z_{in} es la impedancia de entrada que se presenta en la terminal de transmisión en el estado estacionario y Z_0 es la impedancia de la línea.

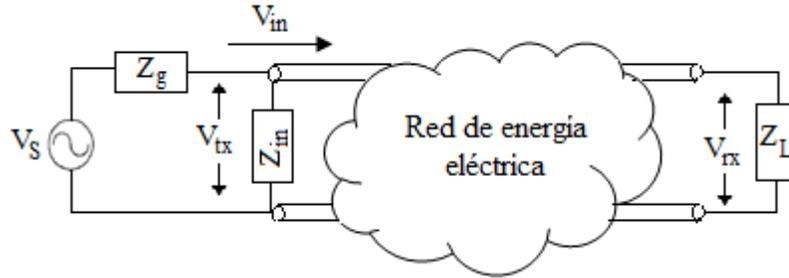


Figura 2.3 Canal punto a punto de una red de energía eléctrica [23]

Modelo de Holger Philipps, modelo eco [24]

El análisis realizado por H. Philips presenta dos modelos diferentes para la descripción de la función de transferencia, un modelo de eco y un modelo de circuito resonante en serie, primero se presenta el modelo eco el cual se basa, en el hecho de que la señal en el receptor no llega en una trayectoria directa; ya que las reflexiones debidas a las bifurcaciones causan ecos (multitrayectorias) en la señal transmitida y por lo tanto la señal transmitida alcanza el receptor no solamente en una trayectoria directa, con retraso y atenuada, sino que este obtiene la señal a través de varias trayectorias (analizadas de la misma forma que en los modelos anteriores).

Al igual que en el modelo anterior la Función de Transferencia se obtiene por medio de la respuesta a una función impulso en tiempo, cuya respuesta viene dada como una suma de N pulsos de Dirac los cuales son atenuados por un factor ρ_v (este es un nuevo factor que no se debe confundir con el coeficiente de reflexión ρ) y retrasados por un factor τ_v :

$$h(t) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| e^{j\phi_v} \delta(t - \tau_v) \quad (2.13)$$

La atenuación compleja de cada trayectoria ρ_v esta dada por:

$$\rho_v = |\rho_v| e^{j\varphi_v} \quad \text{con:} \quad \varphi_v = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{\rho_v\}}{\text{Re}\{\rho_v\}}\right) \quad (2.14)$$

La función de transferencia $H(f)$ puede ser obtenida por medio de una transformación de Fourier de la respuesta al impulso:

$$h(f) = F\{h(t)\} \Rightarrow H(f) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| e^{j\varphi_v} e^{-j2\pi f \tau_v} \quad (2.15)$$

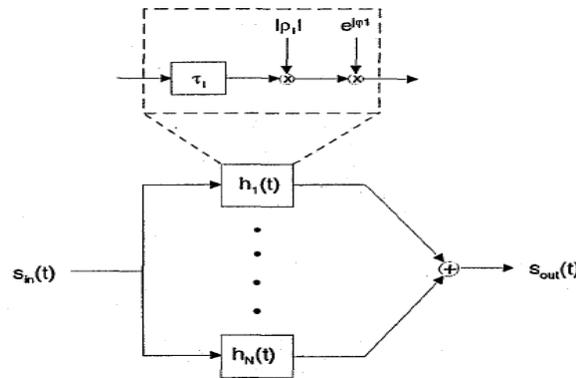


Figura 2.4 Modelo de Eco [24]

En la figura 2.4 se ilustra el modelo de eco, cada trayectoria es descrita por una respuesta al impulso $h_v(t)$ causando un retraso τ_v y una atenuación $|\rho_v|$. La expresión (2.15) representa la función de transferencia para el modelo de eco.

Modelos de la línea con N elementos en cascada

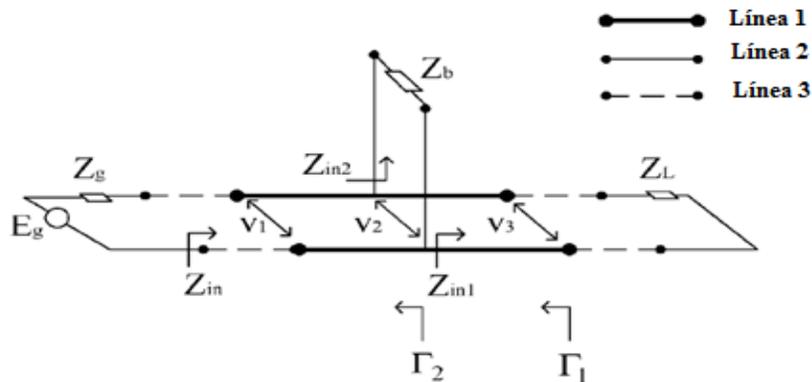
Otra forma mediante la cual se modela la Función de Transferencia de una red eléctrica es haciendo uso de una multiplicación de N elementos en cascada en donde estos elementos pueden ser representados como Funciones de Transferencia o matrices para cada elemento en la red. Los siguientes modelos presentan la Función de Transferencia de esta forma:

- Modelo de H. Meng
- Modelo de Holger Philipps (Circuito Resonante Serie, SRC)
- Modelo de Parámetros de Transmisión

Modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan [18].

El modelo de análisis propuesto por H. Meng hace uso de los parámetros de dispersión, S , para obtener la función de transferencia, primero obtiene los parámetros S de cada bifurcación para después obtener la matriz completa de parámetros S del canal, usando el método de la cadena.

De la figura 2.5 se considera que l_1 es la longitud del cable desde la terminal izquierda de la trayectoria de la línea hasta el punto de bifurcación, l_2 es la longitud del cable ramificado desde el punto de la bifurcación, y l_3 la longitud del cable desde la bifurcación a la terminal derecha de la trayectoria de la línea.



- Z_g : Impedancia de la fuente (50Ω)
- Z_L : Impedancia de carga en la terminal (50Ω)
- Z_b : Impedancia de carga en la rama
- Z_{in1} : Impedancia de entrada de la red a la derecha de bifurcación
- Z_{in2} : Impedancia de entrada de la rama
- Z_{in} : Impedancia de entrada de la red con una sola bifurcación
- Γ_1 : Coeficiente de reflexión desde la terminal
- Γ_2 : Coeficiente de reflexión desde el punto de la bifurcación
- Línea1: Trayectoria de la línea eléctrica con parámetros de línea (Z_0, γ)
- Línea2: Rama de la línea eléctrica con parámetros de línea (Z_0, γ')
- Línea3: Línea de transmisión con impedancia característica de 50Ω (longitud despreciable)

Figura 2.5 Diagrama detallado para una red con una sola rama [18]

Haciendo uso de la teoría de línea de transmisión, se utilizan (1.33) y (1.35) para determinar Z_{in1} , Z_{in2} , Z_{in} , Γ_1 y Γ_2 (Γ es el coeficiente de reflexión).

Los parámetros S_{11} y S_{21} de la matriz de dispersión de la red están dados por [26-28]:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - 50}{Z_{in} + 50} \quad (2.16)$$

$$S_{21} = 2 \frac{V_3}{E_g} \quad (2.17)$$

Ya que no es fácil obtener la relación de E_g y V_3 en (2.17), S_{21} puede ser calculada indirectamente por medio de [18]:

$$S_{21} = 2 \frac{V_3}{V_2} \frac{V_2}{V_1} \frac{V_1}{E_g} \quad (2.18)$$

dónde:

$$\frac{V_1}{E_g} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} ; \quad \frac{V_3}{V_2} = \frac{(1 + \Gamma_1)e^{-\gamma l_3}}{1 + \Gamma_1 e^{-\gamma l_3}} ; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{(1 + \Gamma_2)e^{-\gamma l_4}}{1 + \Gamma_2 e^{-\gamma l_4}}$$

y sustituyendo las tres expresiones anteriores en (2.18), se puede obtener S_{21} . Un método similar puede ser usado para determinar S_{12} y S_{22} simplemente intercambiando de lugar la fuente y la carga.

Después de analizar la red de una sola ramificación, la tarea restante es la determinación de la matriz de parámetros de dispersión para una cascada de varias ramificaciones. Dos métodos que pueden ser usados son la cadena de matrices y el uso de un gráfico del flujo de la señal; H. Meng [18] utiliza el primer método.

Para realizar esto primero se convierte cada matriz de dispersión S en su equivalente a matriz T mediante la siguiente relación:

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{21}} & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \frac{S_{11}S_{22}}{S_{21}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Entonces la matriz T total para una red de N -ramas estará dada por la multiplicación de cada una de sus ramas mediante:

$$[T] = \prod_{k=1}^N [T_k] \quad (2.20)$$

donde T_k es matriz T para la k -ésima porción en cascada de la red. Finalmente, la matriz S para la red completa puede ser obtenida a partir de la matriz de transmisión total T , usando la siguiente ecuación:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ 1 & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

En donde el término S_{21} en (2.27) es la Función de Transferencia de la red

Modelo Holger Philipps del Circuito Resonante Serie, SRC [24]

Al realizar mediciones de impedancia en diversos electrodomésticos, se ha mostrado que en muchos casos, estos pueden ser descritos como circuitos resonantes serie RLC . Por lo tanto un canal de energía eléctrica puede ser descrito como una cascada de circuitos resonantes en serie desacoplados (SRC , Series Resonant Circuits). La figura 2.6 muestra un circuito resonante serie conectado a la línea con una impedancia Z .

La impedancia del circuito resonante serie Z_s es la dependiente de la frecuencia y puede ser descrito por:

$$Z_s(f) = R + j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} \quad (2.28)$$

A la frecuencia de resonancia f_{res} :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.29)$$

La impedancia es mínima con una parte imaginaria igual a cero y una parte real igual a R .
 La función de transferencia $H(f)$ es:

$$H(f) = \frac{1}{1 + \frac{Z}{Z_s(f)}} \quad (2.30)$$

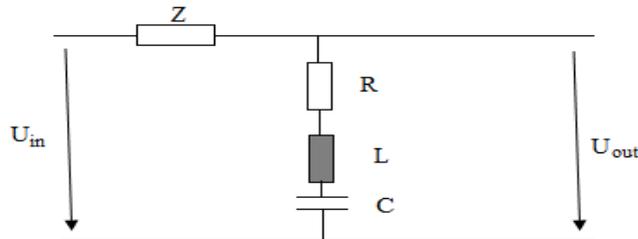


Figura 2.6 Circuito resonante serie

La función de transferencia de la línea de energía eléctrica se modela como una cascada de N circuitos resonantes en serie desacoplados. En la figura 2.7 se ilustra un diagrama a bloques de este modelo.

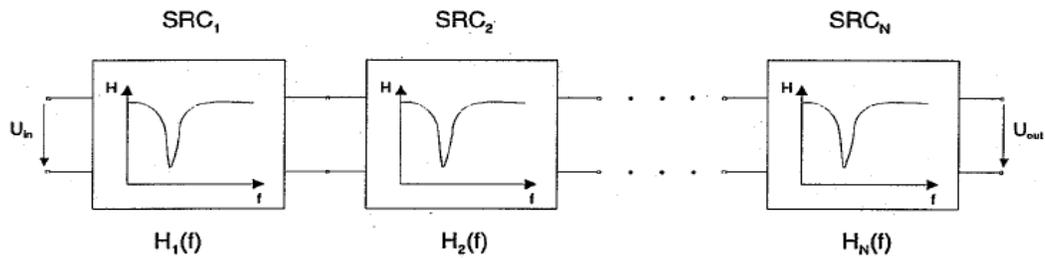


Figura 2.7 Modelo del circuito resonante serie [24]

Cada circuito resonante es descrito por una función de transferencia $H_i(f)$ y la función de transferencia total $H(f)$ es:

$$H(f) = \prod_{i=1}^N H_i(f) \quad (2.31)$$

La expresión (2.31) representa a la Función de Transferencia del modelo del Circuito Resonante Serie.

Modelo de Parámetros de Transmisión (con bifurcaciones)

A continuación sólo se dará una breve descripción del cómo obtener mediante el modelo de parámetros de Transmisión la Función de Transferencia para una línea con bifurcaciones. Algunas propiedades de este se desarrollan más a fondo en el siguiente capítulo, debido a que este será la base para analizar y proponer una forma de modelar una línea no uniforme.

Para obtener la función de transferencia de una línea con N bifurcaciones, como la que se muestra en la figura 2.8, cada una de estas bifurcaciones debe ser reemplazada por la impedancia equivalente vista desde los puntos en donde esta inicia, ($A_N B_N$, N corresponde a la N -ésima bifurcación). Esta impedancia equivalente se calcula, por medio de cualquiera de las expresiones (1.34) o (1.35).

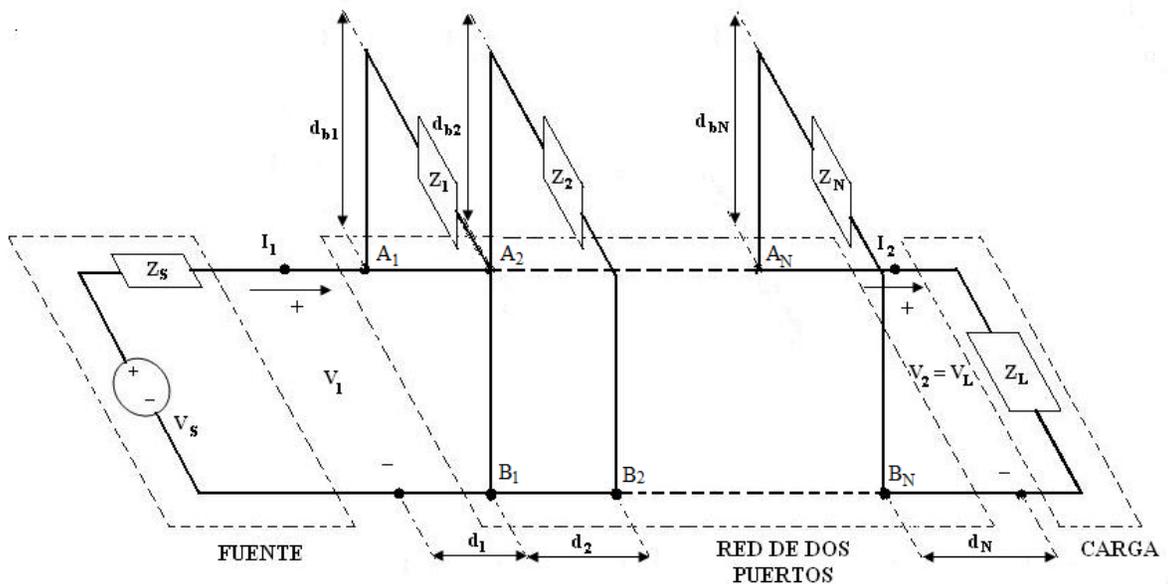


Figura 2.8 La línea con N bifurcaciones

A partir de las impedancias equivalentes calculadas para cada bifurcación se reemplaza cada una de estas bifurcaciones por impedancias conectadas en paralelo con la línea, tal y como se muestra en el circuito de la figura 2.9.

En la figura 2.9, el circuito se divide en $2N+1$ subcircuitos en cascada; esto depende del número de bifurcaciones N en la línea, y para cada subcircuito es posible determinar su matriz de transmisión $ABCD$ por medio de:

$$\Phi = \prod_{i=0}^{2N+1} \Phi_i \quad (2.32)$$

En donde N es el número de bifurcaciones y

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \Phi_{impar} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}; \quad \Phi_{par} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{eq} & 1 \end{bmatrix}$$

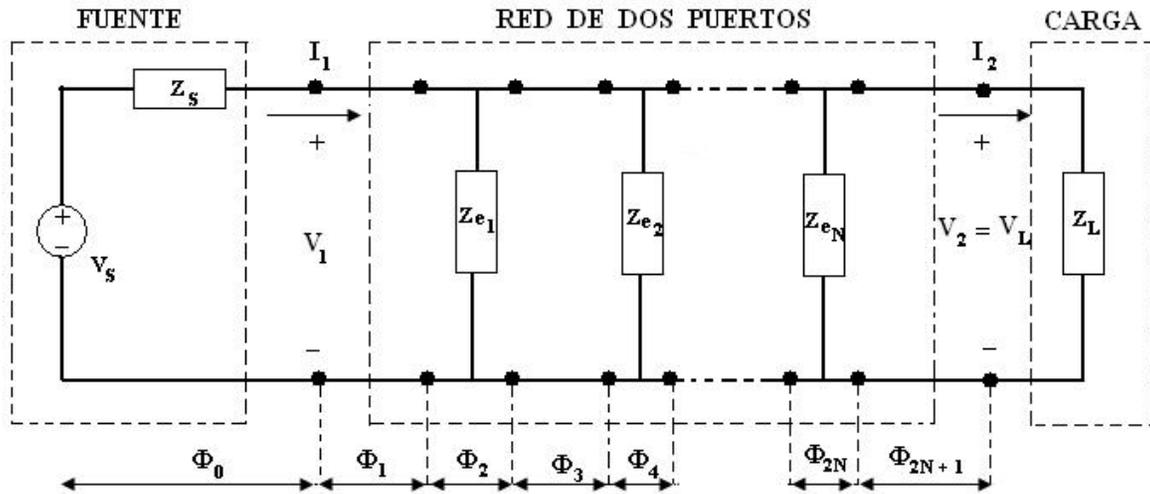


Figura 2.9 Circuito equivalente de la figura 3.3

Una vez que se obtiene la matriz total ABCD mediante 2.32 la función de transferencia de un circuito con N bifurcaciones puede calcularse usando (2.5).

2.4 Evaluación de los diversos modelos

En esta parte se realiza una evaluación de cada uno de los modelos presentados para una red uniforme a la cual se le agregaran diversas cargas (bifurcaciones). Las mediciones de la Función de Transferencia se obtuvieron mediante un Analizador de Redes HP4195A [29] en una línea que presenta la topología mostrada en la figura 2.10. Se conectaron dos acopladores al Analizador para rechazar los 60 Hz del voltaje de 127 VCA propio de la red eléctrica y no dañar el equipo [30-34], Apéndice A.

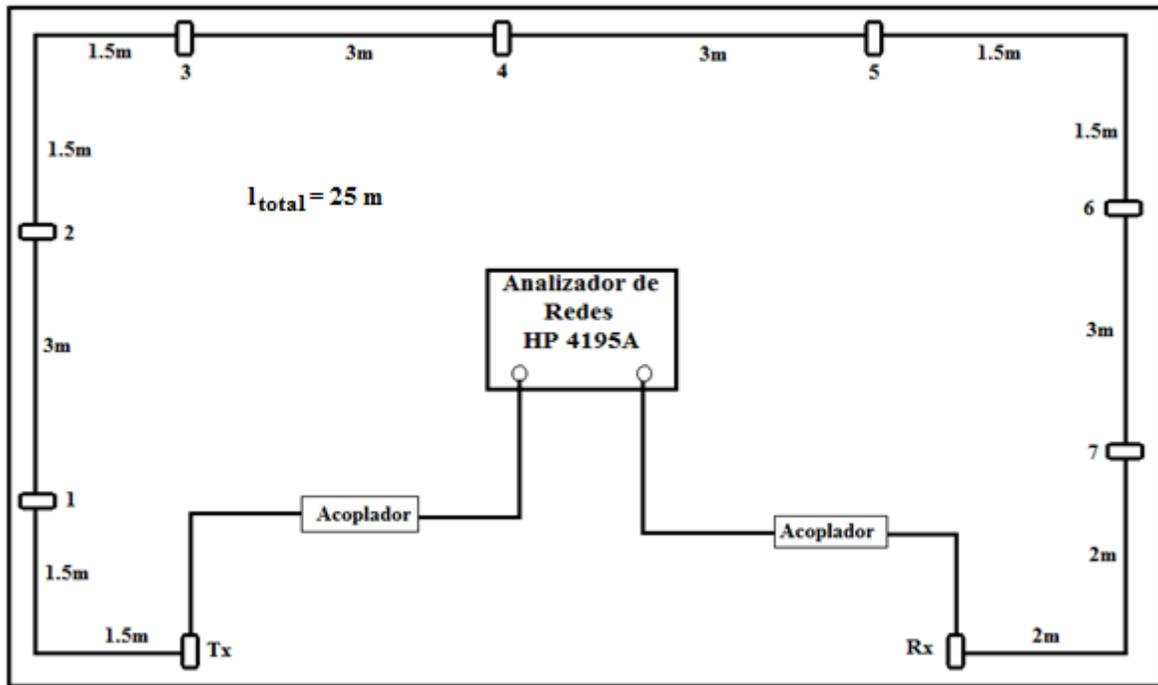


Figura 2.10 Topología de la línea eléctrica utilizada en las mediciones

Primero se aplican los modelos de línea uniforme sin bifurcaciones, los resultados de estos modelos son mostrados y comparados con la función experimental en la figura 2.11.

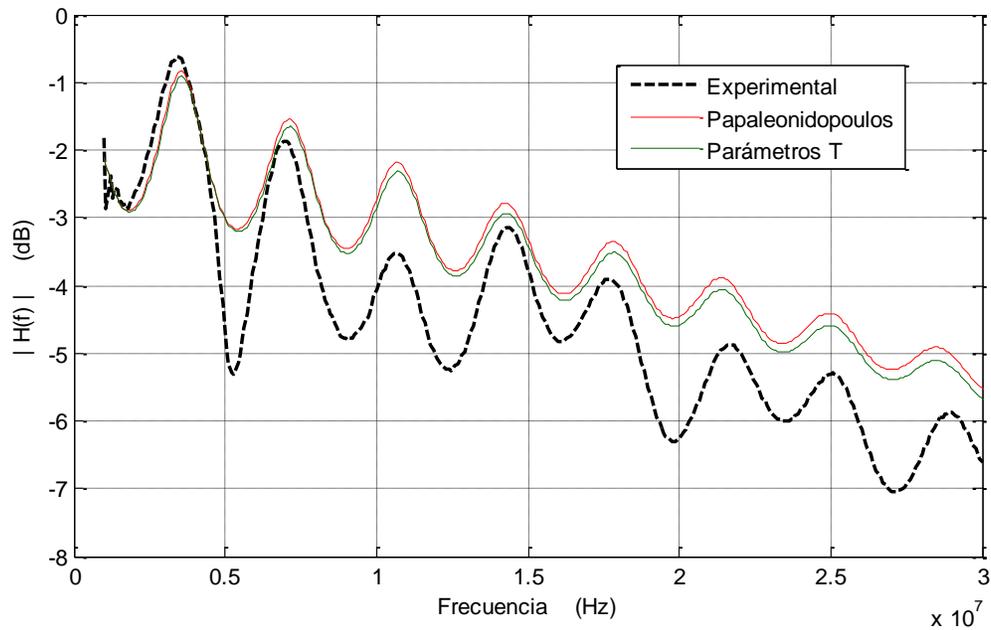


Figura 2.11 Funciones de Transferencia experimental y teóricas de la línea uniforme de 25m sin bifurcaciones.

Puede verse que ambos modelos presentan funciones con un comportamiento muy similar aunque la atenuación es un poco mayor en la experimental además de existir un pequeño desfase en frecuencia de los modelos en las frecuencias más altas con respecto a la experimental. Para evaluar el desempeño de estos modelos de manera cuantitativa se utilizó un factor de correlación r , el cual describe el grado de relación entre dos funciones, así como un valor $rmse$ (root mean square error, error cuadrático medio), el cual cuantificará las diferencias entre dos funciones (Apéndice C), estos valores se presentan en la tabla 2.2.

Línea sin bifurcaciones			
Papaleonidopoulos		Parámetros T	
r	$rmse$	r	$rmse$
0.9498	1.0942	0.9481	0.9932

Tabla 2.2 Resultados de la línea sin bifurcaciones

De la tabla 2.2 se puede decir que el modelo de Parámetros T es el que mejor desempeño tiene ya que aunque en ambos se presenta casi el mismo factor de correlación entre los modelos y la función experimental, ambos modelos tienen un alto grado de correlación, el modelo de Parámetros T presenta un valor $rmse$ más bajo.

Después se procedió a evaluar el resto de los modelos con diversas bifurcaciones de la misma forma que el anterior. En las siguientes figuras 2.12 – 2.25 se muestran esquemas simplificados de la red con diferentes bifurcaciones y los resultados de todos los modelos examinados así como su respectiva función experimental. En la tabla 2.3 se agrupan los datos obtenidos

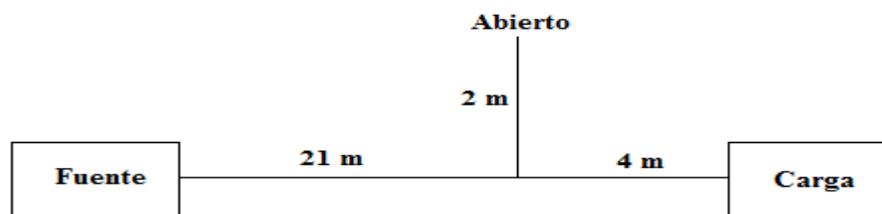


Figura 2.12 Línea uniforme de 25 m. con una bifurcación de 2 m. terminada en abierto

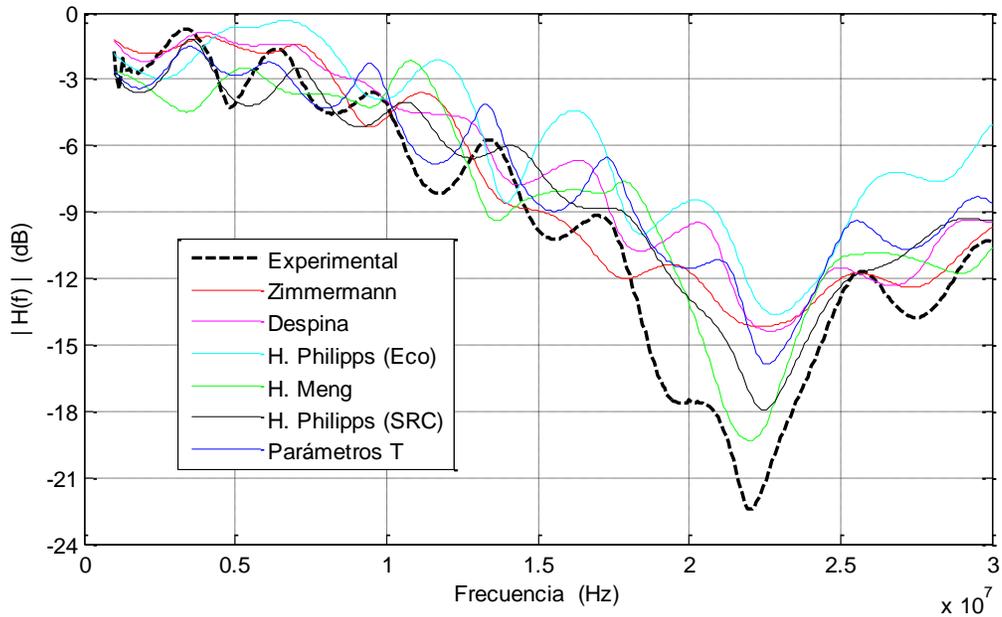


Figura 2.13 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto

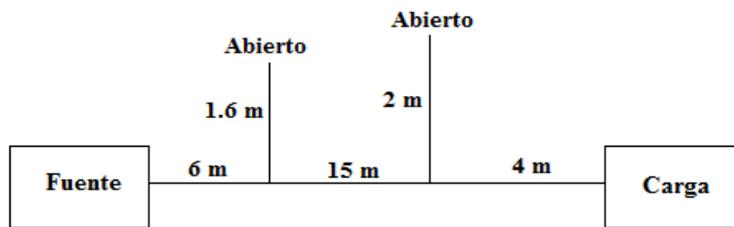


Figura 2.14 Línea uniforme de 25 m. con dos bifurcaciones de 1.6 y 2 m terminadas en abierto

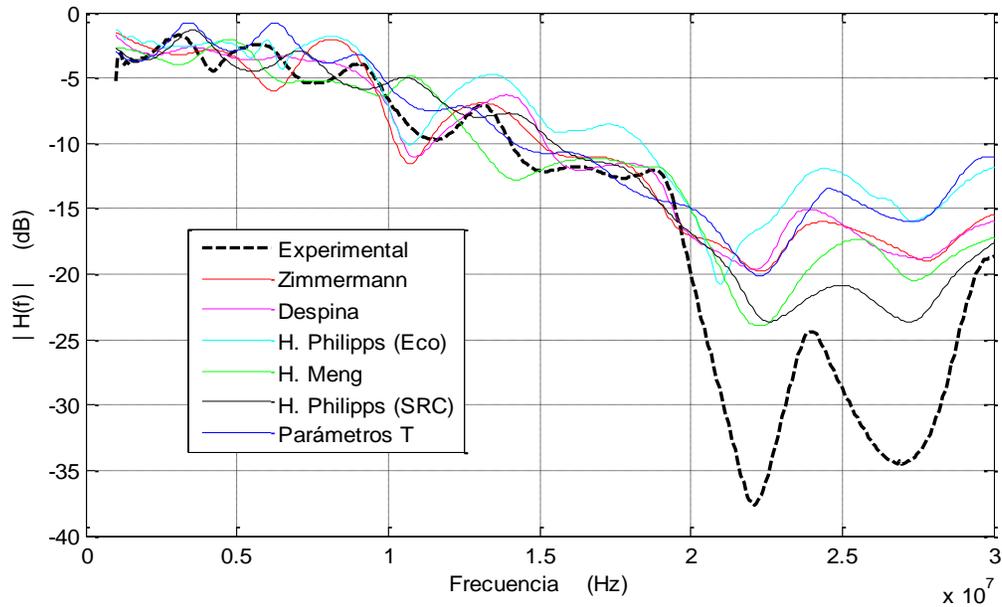


Figura 2.15 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 y 2 m terminadas en abierto.

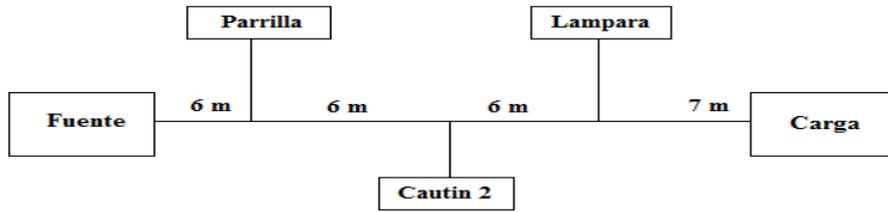


Figura 2.16 Línea uniforme de 25 m. con tres bifurcaciones

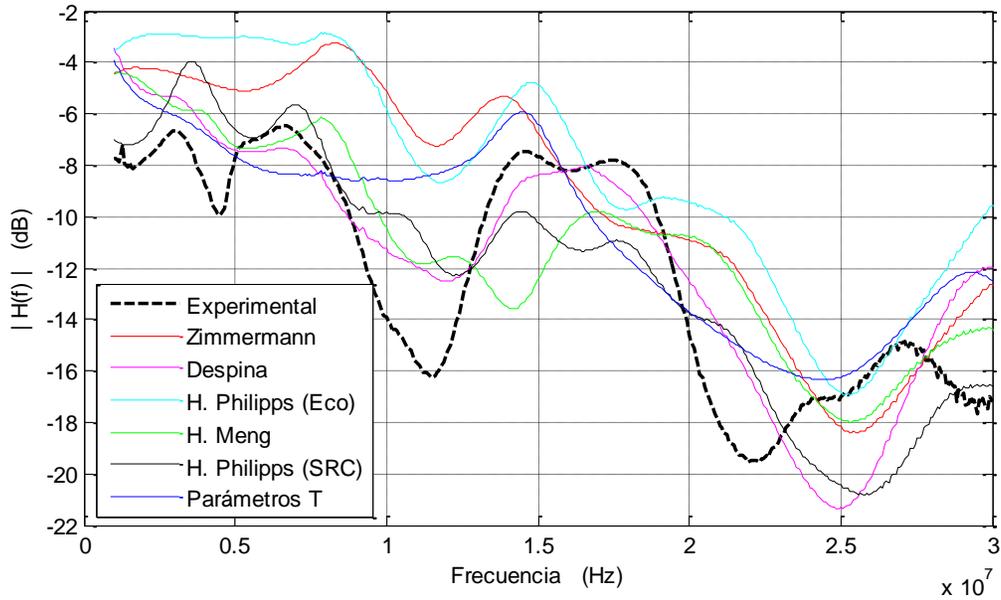


Figura 2.17 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25m con tres bifurcaciones.

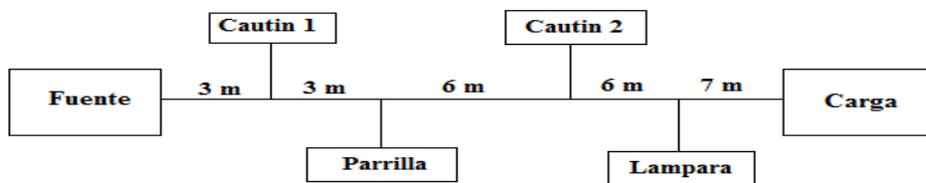


Figura 2.18 Línea uniforme de 25m con cuatro bifurcaciones.

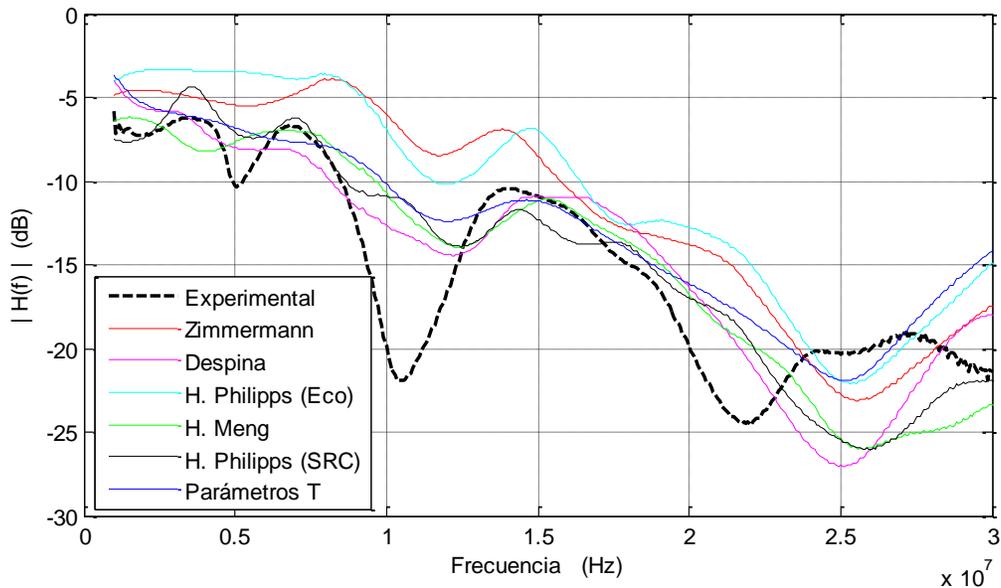


Figura 2.19 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones.



Figura 2.20 Línea uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones

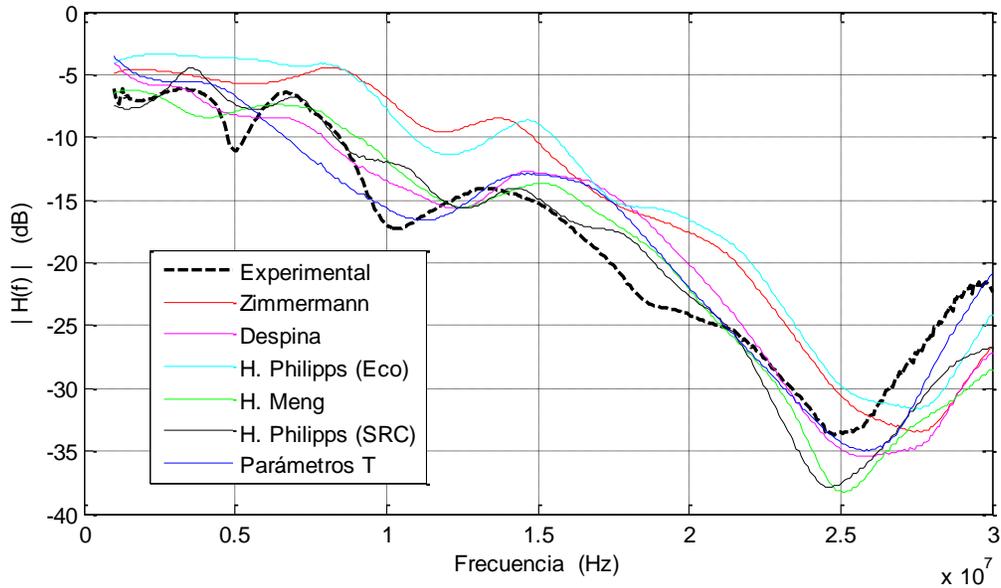


Figura 2.21 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones.

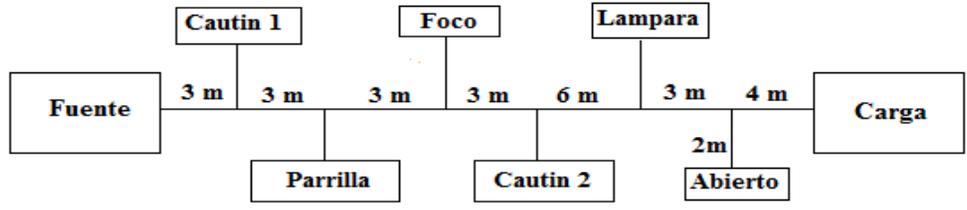


Figura 2.22 Línea uniforme de 25 m. con seis bifurcaciones

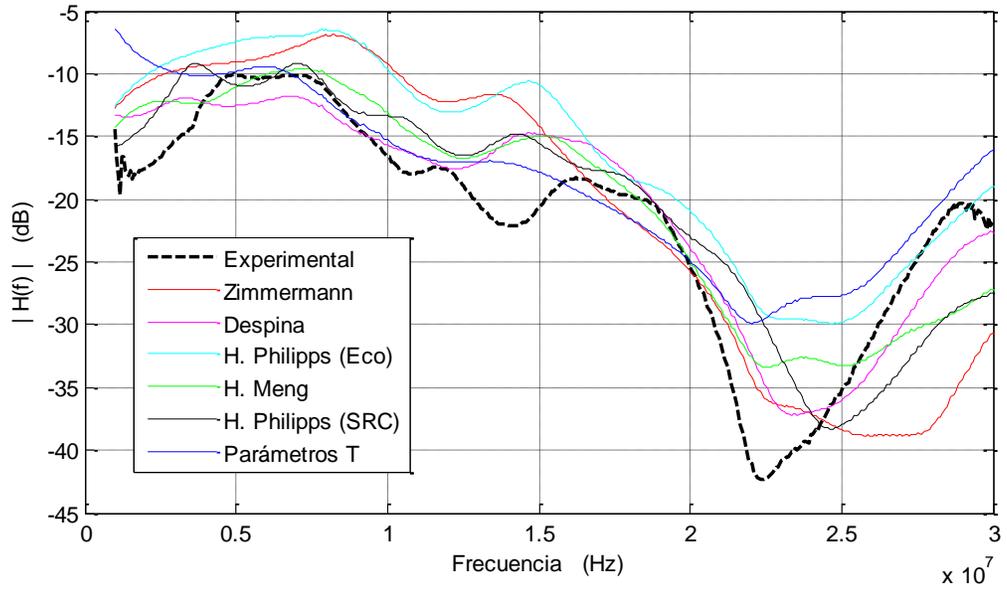


Figura 2.23 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m. con seis bifurcaciones.

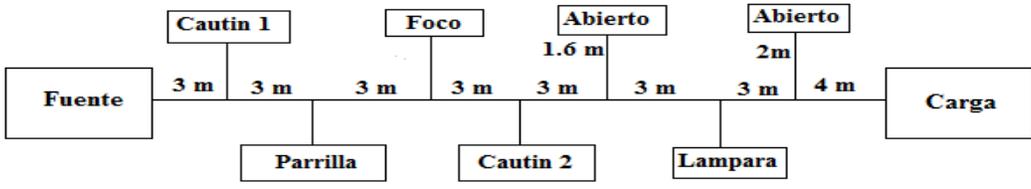


Figura 2.24 Línea uniforme de 25 m. con siete bifurcaciones

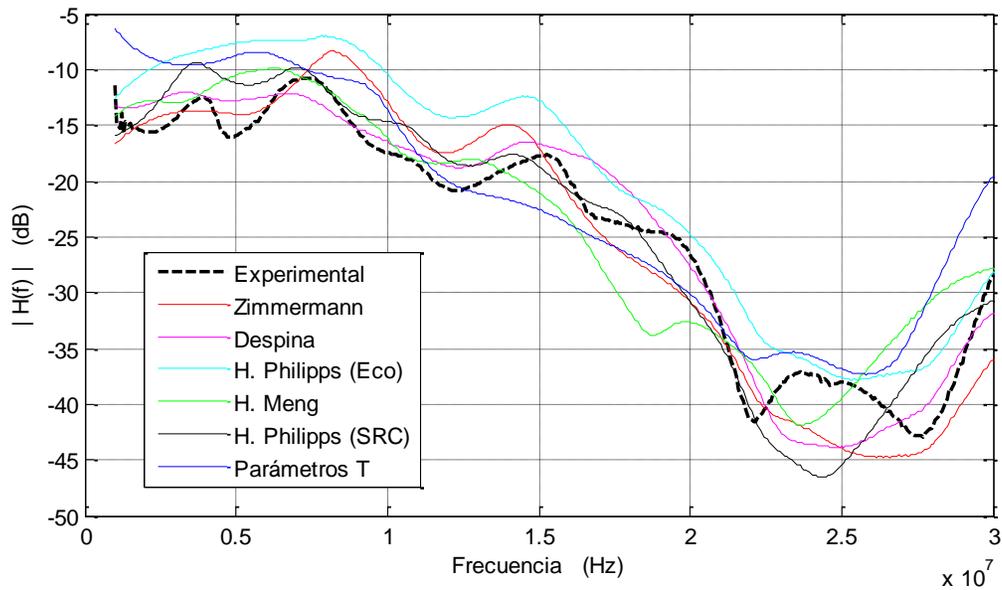


Figura 2.25 Funciones de Transferencia experimental y de los modelos para la línea uniforme de 25 m con siete bifurcaciones

Línea con varias bifurcaciones												
No. de Bifu	H. Philipps (SRC)		H. Meng		H. Philipps (Eco)		Despina		Zimmermann		Parámetros T	
	<i>R</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>Rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>R</i>	<i>Rmse</i>
1	0.9703	2.3568	0.9303	2.5761	0.8974	4.7084	0.9326	3.3924	0.9219	2.8916	0.9759	3.0983
2	0.9664	5.4639	0.9519	6.3726	0.9181	9.1579	0.9406	7.4431	0.9303	7.4501	0.9068	8.4378
3	0.8187	2.7850	0.7510	3.0407	0.7830	4.8454	0.8556	2.4627	0.7430	4.3270	0.7865	3.1153
4	0.8317	3.6675	0.8288	3.7087	0.8226	5.5811	0.8493	3.4132	0.7824	5.3791	0.8562	3.6595
5	0.9716	2.7613	0.9545	3.2839	0.9288	5.3822	0.9340	3.5494	0.9106	5.2820	0.9606	2.5647
6	0.8635	4.8551	0.8985	4.1905	0.9193	6.3232	0.9336	3.3625	0.8331	6.6697	0.9041	5.0946
7	0.9597	3.5783	0.9038	4.5383	0.9841	5.0125	0.9761	2.6777	0.9769	3.3308	0.9055	5.0171

Tabla 2.3 Resultados de la línea con diversas bifurcaciones

Todos los modelos presentan resultados muy similares en su factor de correlación entre la función del modelo y la experimental para las diversas topologías de las líneas presentadas y no se puede dar una conclusión sobre cuál de ellos es el que mejor desempeño presenta ya que aunque el *rmse* para el caso de una topología en particular de buenos resultados al aplicarlo en otra, este puede llegar a no ser el más óptimo. Realizar un estudio en otras topologías de red con la finalidad de encontrar cual es el modelo óptimo para la descripción de los canales de comunicación PLC uniformes puede dejarse como un posible trabajo a

futuro esto debido a que actualmente no existe un modelo de análisis universalmente reconocido. En el presente trabajo el objetivo de realizar esta evaluación es observar su desempeño frente al modelo propuesto en una red no uniforme, estos resultados se presentan en el capítulo 4.

CAPITULO 3

MODELO DE ANALISIS DE LINEAS NO UNIFORMES POR PARAMETROS DE TRANSMISIÓN

3.1 Introducción

El modelo de Parámetros de Transmisión ya fue presentado en el capítulo anterior y se ha dejado el análisis de algunas de sus propiedades para este capítulo ya que estas serán la base de la propuesta de análisis para redes no uniformes; es decir, líneas de transmisión que no presentan las mismas características físicas y/o geométricas a todo lo largo de esta. Se partirá de este modelo para proponer una forma de obtener la Función de Transferencia de la línea eléctrica cuando esta presenta estas características de no uniformidad.

En este modelo propuesto se considera a la línea eléctrica como una red de dos puertos y como aportación con respecto a otros modelos basados en el análisis por parámetros de transmisión [21] se toma en cuenta la no uniformidad que suele presentarse en las instalaciones eléctricas domésticas, la cual no ha sido presentada en los modelos anteriores descritos en la literatura [18-25], ya que todos consideran que esta es uniforme a lo largo del canal.

3.2 La línea vista como una red de dos puertos

Como se mencionó en los capítulos anteriores la línea de energía eléctrica puede ser modelada como una Red de Dos Puertos (*R2P*) y su comportamiento puede ser descrito mediante una Matriz de Transmisión, o matriz *ABCD*, figura 3.1 y las ecuaciones que describen el comportamiento de esta en forma matricial vienen dadas por la expresión (1.38):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

También se definió la matriz T como:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

en donde los parámetros $ABCD$ representan las siguientes relaciones:

$$A = D = \cosh \gamma l; \quad B = Z_0 \sinh \gamma l; \quad C = \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l \quad (2.3)$$

Estos coeficientes $ABCD$ están definidos de la siguiente forma:

$$A = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_2=0}; \quad B = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{V_2=0}; \quad C = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{I_2=0}; \quad D = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_2=0}$$

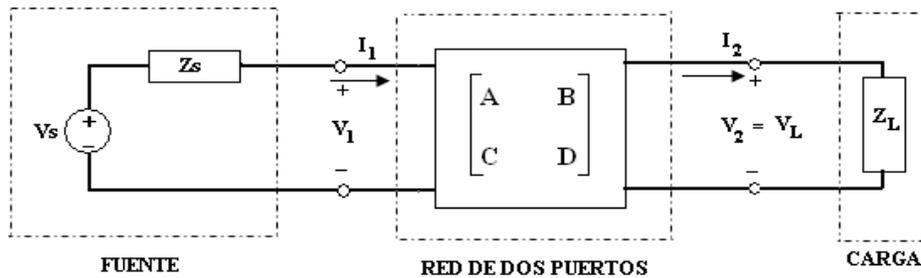


Figura 3.1 La línea representada como una red de dos puertos.

La matriz de transmisión T en (2.4), la cual modela una línea de longitud l , satisface las siguientes propiedades [20]:

- P1. $A = D$ para cualquier frecuencia
- P2. $B \neq C$ para cualquier frecuencia
- P3. $\det(T) = AD - BC = 1$
- P4. $T = T^l$, es decir, $T_d = T_i$, $d =$ directa e $i =$ inversa

De la propiedad P3 se deduce que el modelo de la $R2P$ de la línea es una red recíproca, es decir satisface el teorema de reciprocidad, el cual establece que cualquier función de transferencia con dimensiones de impedancia o admitancia permanece sin cambios si los puntos de excitación y respuesta son intercambiados. De la propiedad P4, también se

deduce que la línea es un canal simétrico, en el sentido de que exhibe el mismo comportamiento si es manejado de un lado o del otro, estipulando que la fuente y la impedancia de carga son intercambiadas, lo que en un canal de comunicación se puede traducir como un factor de estabilidad, lo cual es deseable.

Usando el modelo de una $R2P$ la Función de Transferencia $H = V_L/V_S$ del circuito de la figura 2.3 dada en términos de los parámetros $ABCD$ es la que se mostró en (2.5):

$$H = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_S Z_L + DZ_S} \quad (2.5)$$

Otro parámetro importante, la impedancia de entrada en la línea, también puede calcularse en función de los parámetros $ABCD$ mediante la siguiente expresión [20, 21]:

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (3.1)$$

3.3 La regla de la cadena

En general una línea de energía eléctrica doméstica no es uniforme, es decir, se encuentra constituida de varias secciones y cada sección puede estar constituida por cables de diferentes calibres y longitudes con diferente separación entre conductores, lo que significa que cada sección tendrá su propia Matriz de Transmisión $ABCD$.

Es por esto que se hace uso de la regla de la cadena la cual es una propiedad importante de la Matriz de Transmisión, y parte esencial en este trabajo, ya que nos permite manejar fácilmente conexiones en cascada en redes de dos puertos.

Para una configuración de red dada, como la de la figura 3.2, constituida de varias secciones, la matriz $ABCD$ total de la red se obtiene multiplicando las matrices de cada sección de la red, es decir, a través de la regla de la cadena. Por lo tanto, si $T_d^{(i)}$ es la i -ésima matriz de transmisión directa de la i -ésima sección, la matriz de transmisión completa de toda la red constituida de N secciones está dada por la siguiente relación [20]:

$$T_d = T_d^{(1)} \cdot T_d^{(2)} \cdot \dots \cdot T_d^{(N)} \quad (3.2)$$

Similarmente, la matriz de transmisión inversa total de la red constituida por N secciones está dada por la siguiente relación:

$$T_i = (T_d)^{-1} = (T_d^{(N)})^{-1} \cdot (T_d^{(N-1)})^{-1} \cdot \dots \cdot (T_d^{(1)})^{-1}$$

Cada matriz de transmisión $T_d^{(i)}$ es del tipo (3.2) y por lo tanto satisface las cuatro propiedades P1, P2, P3 y P4, y en particular de la propiedad P4 podemos escribir:

$$T_i = (T_d)^{-1} = T_d^{(N)} \cdot T_d^{(N-1)} \cdot \dots \cdot T_d^{(1)} \quad (3.3)$$

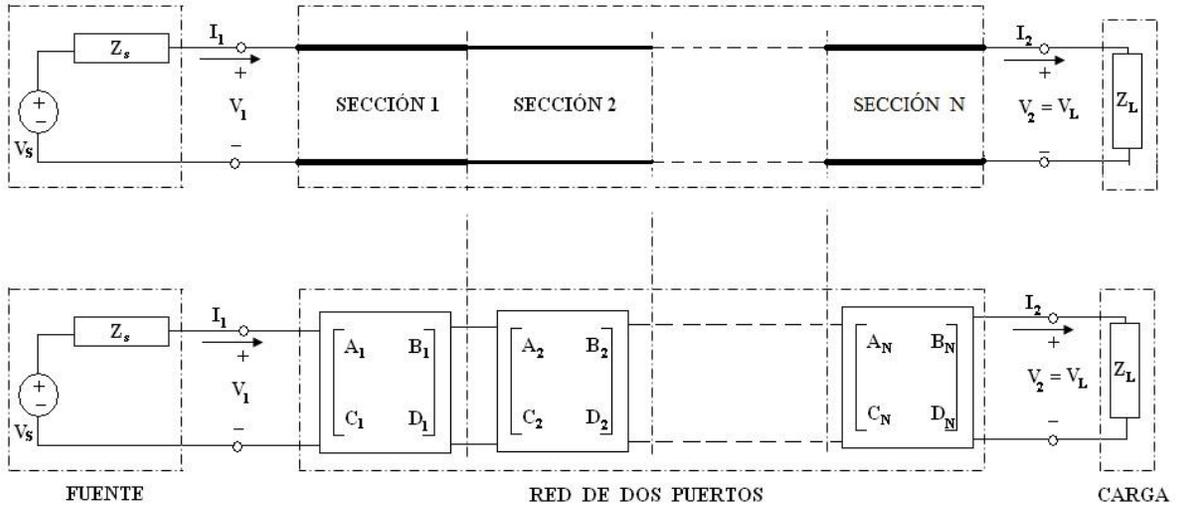


Figura 3.2 Línea constituida de varias secciones

Una vez que se ha obtenido la Matriz de Transmisión total $ABCD$ por medio de la regla de la cadena la Función de Transferencia de la línea se obtiene mediante (2.5) Este procedimiento fue utilizado para analizar la línea con bifurcaciones y se usará para resolver el caso en que no existe uniformidad en la línea.

3.4 La prueba de simetría de la línea

Antes de obtener la Función de Transferencia de una línea no uniforme con bifurcaciones se demostrará matemáticamente una de las propiedades que posee la red eléctrica como canal de comunicación: la simetría de la línea. La multiplicación de matrices, usualmente, no satisface la propiedad conmutativa, por lo tanto T_d en (3.2) es diferente de T_b (3.3). La multiplicación de matrices es conmutativa si y solo si las dos matrices comparten eigenvectores comunes. Sin embargo, este no es el caso porque los eigenvectores de una matriz del tipo (2.4) está dada por:

$$u_1 = [\alpha Z_0 \quad \alpha] \quad y \quad u_2 = [-\alpha Z_0 \quad \alpha]$$

Estos eigenvectores dependen de la impedancia característica del cable y, por lo tanto, las matrices de transmisión correspondientes a dos diferentes tipos de cable (es decir, con dos impedancias características diferentes) tendrán diferentes eigenvectores. Aunque parezca ilógico, esto significa que aún una simple conexión constituida por dos cables diferentes empalmados tendrá diferentes matrices totales directas e inversas.

Aunque las matrices de transmisión totales directa e inversa de un canal PLC son diferentes, la propiedad de reciprocidad, P3, para T_d y T_i se mantiene:

$$\det(T_d) = \det(T_d^{(1)} \cdot T_d^{(2)} \cdot \dots \cdot T_d^{(N)}) = \det(T_d^{(1)}) \cdot \dots \cdot \det(T_d^{(N)}) = 1,$$
$$\det(T_i) = \det(T_d^{(N)} \cdot T_d^{(N-1)} \cdot \dots \cdot T_d^{(1)}) = \det(T_d^{(N)}) \cdot \dots \cdot \det(T_d^{(1)}) = 1.$$

Por lo tanto, la conexión en cascada de redes de dos puertos continua siendo una red reciproca de dos puertos. Sin embargo, el hecho de que la red completa pueda ser modelada como una red reciproca de dos puertos no significa que la línea eléctrica sea un canal simétrico (es decir, tenga la misma respuesta en frecuencia en ambas direcciones). Además, la propiedad de simetría se satisface si y solo si las propiedades P1 y P3 se satisfacen. En el caso de una red compuesta de varias secciones, la propiedad P1 no se satisface para la matriz de transmisión total del canal.

Las matrices de transmisión directa e inversas de una línea eléctrica son, por definición, diferentes. Sin embargo, se puede probar que las funciones de transferencia son las mismas manteniendo las impedancias de fuente y carga iguales. Esto no puede ser probado por medio del teorema de reciprocidad pero puede ser probado de otra forma [20]. Considerando las expresiones generales para las matrices de transmisión directa e inversa, T_d y T_i , dadas en (3.2) y (3.3):

$$T_d = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = T_d^{(1)} \cdot \dots \cdot T_d^{(N)}, \quad T_i = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = T_d^{(N)} \cdot \dots \cdot T_d^{(1)} \quad (3.4)$$

Las matrices T_d y T_i en (3.4) son la cadena de matrices de un canal compuesto de varias secciones y, por lo tanto, ellas satisfacen solamente la propiedad P3, es decir ellas tienen un determinante unitario, por el otro lado, las matrices $T_d^{(i)}$ satisfacen todas las propiedades, P1, P2, P3 y P4, para cualquier i . A partir de las propiedades de multiplicación de matrices, es posible demostrar que las siguientes relaciones siempre se mantienen:

$$A_1 - A_2 = -(D_1 - D_2), \quad B_1 - B_2 = C_1 - C_2 = 0 \quad (3.5)$$

Las funciones de transferencia directa e inversa, H_d y H_i del canal pueden ser calculadas a partir de la cadena de matrices en (2.5) de la siguiente forma:

$$H_d = \frac{Z_L}{A_1 Z_L + B_1 + C_1 Z_S Z_L + D_1 Z_S}; \quad H_i = \frac{Z_L}{A_2 Z_L + B_2 + C_2 Z_S Z_L + D_2 Z_S}.$$

La diferencia entre los recíprocos de las cantidades previas es:

$$\Delta H = \frac{1}{H_d} - \frac{1}{H_i} = \frac{(A_1 - A_2)Z_L + (B_1 - B_2) + (C_1 - C_2)Z_S Z_L + (D_1 - D_2)Z_S}{Z_L}$$

Haciendo uso de las relaciones de (3.7), finalmente se obtiene:

$$\Delta H = \frac{(A_1 - A_2)(Z_L - Z_S)}{Z_L}$$

Si $Z_L = Z_S$, se tiene:

$$\Delta H = \frac{1}{H_d} - \frac{1}{H_i} = 0 \Rightarrow H_d = H_i$$

Ya que A_1 y A_2 son cantidades diferentes de cero y diferentes para cada configuración de cable, se puede establecer que sí y solo si Z_L y Z_S son iguales, las funciones de transferencia directa e inversa son iguales, y por lo tanto, el canal es simétrico.

3.5 La no uniformidad de la línea

Por lo general, los conductores de la línea eléctrica doméstica se encuentran dentro de un tubo; ya sea metálico, conduit, o de plástico, al interior de las paredes de la casa, por lo cual no es posible conocer la distribución de estos. En la figura 3.3, se muestra un corte longitudinal del cómo se encuentra constituida una sección de la línea, se puede ver claramente que la distribución de la línea no es uniforme, aunque cada conductor sea uniforme, la separación que hay entre ellos no es la misma, lo cual ocasiona que los parámetros básicos R , L , C y G , varíen a lo largo de toda la línea y en consecuencia al variar estos, los demás parámetros necesarios para el cálculo de la función de transferencia tampoco serán uniformes.

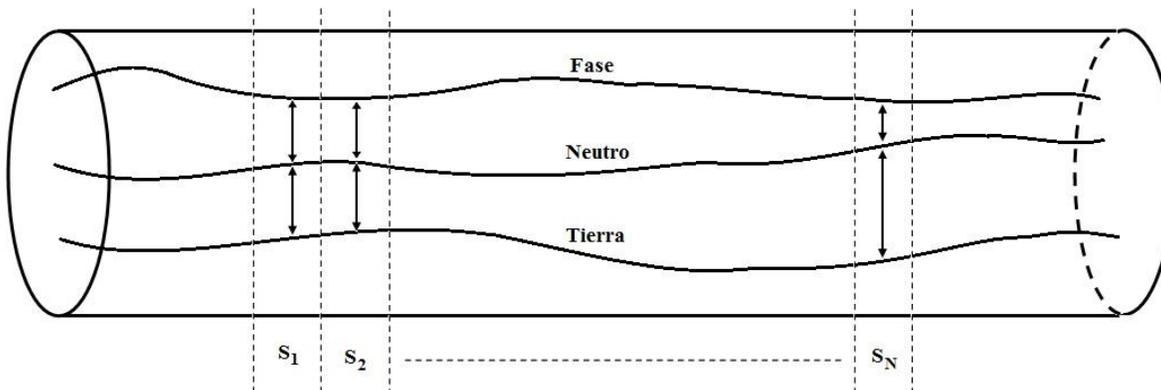


Figura 3.3 Distribución de los conductores en un segmento de la línea eléctrica

Para resolver esto se optó por dividir toda la línea en N secciones, S_1, S_2, \dots, S_N , (N será un número aleatorio), cada una de estas secciones tendrá la misma longitud (la cual dependerá del número de secciones y la longitud de la línea), es decir $l_{S_1} = l_{S_2} = \dots = l_{S_N}$, y se considerará que en esta sección la distancia entre los conductores es uniforme; y como

tampoco es posible conocer que posiciones ocupan estos dentro del tubo, estas también serán asignadas de manera aleatoria. Una vez que se tienen estos parámetros es posible obtener la matriz de transmisión $ABCD$ de cada una de estas secciones y después hacer uso de la regla de la cadena para obtener la matriz de transmisión $ABCD$ total de toda la línea y calcular la función de transferencia de la línea usando (2.5).

Aunque los demás modelos presentados en el capítulo 2 podrían llegar a ser aplicables para líneas no uniformes el procedimiento para obtener los parámetros básicos necesarios de una línea no uniforme es muy complicado y laborioso, ya que se tendría que hacer uso de una nueva teoría de Líneas de Transmisión llamada Súper Teoría de Líneas de Transmisión (Transmission-Line Super Theory, TLST) [35-40], por lo cual una de las aportaciones de este trabajo radica en proponer este método como una forma más simple de analizar la línea.

3.6 La línea no uniforme con bifurcaciones

El procedimiento para obtener la Función de Transferencia de una línea no uniforme con bifurcaciones es básicamente el mismo que el expuesto en el capítulo anterior, solo que ahora debe tomarse en consideración que el segmento de línea que se encuentra entre las bifurcaciones no es uniforme, figura 3.4, por lo que la matriz $ABCD$ de este segmento no puede obtenerse de la misma manera y para obtener la matriz de transmisión de la sección N de línea que se encuentra entre las bifurcaciones, se procede a segmentar la sección y calcular por la regla de la cadena una matriz $ABCD$ total de sección, figura 3.5.

Una vez que se ha obtenido la matriz $ABCD$ de cada una de las secciones entre bifurcaciones, esta se sustituye en un circuito equivalente como el de la figura 2.9, solo que en este caso los subcircuitos Φ_{impares} corresponden a secciones no uniformes, ya no a segmentos de línea, y la matriz $ABCD$ de esta sección ya no cumplirá con las cuatro propiedades descritas, $P1$, $P2$ y $P4$, solo se satisface $P3$ [20].

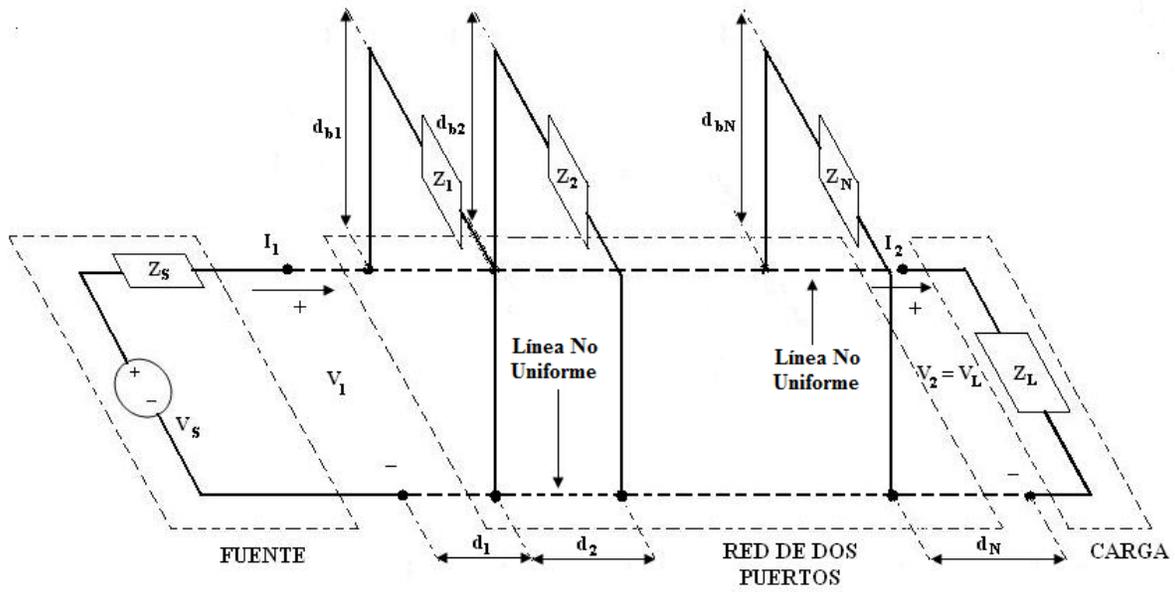


Figura 3.4 Línea de Transmisión no uniforme con bifurcaciones

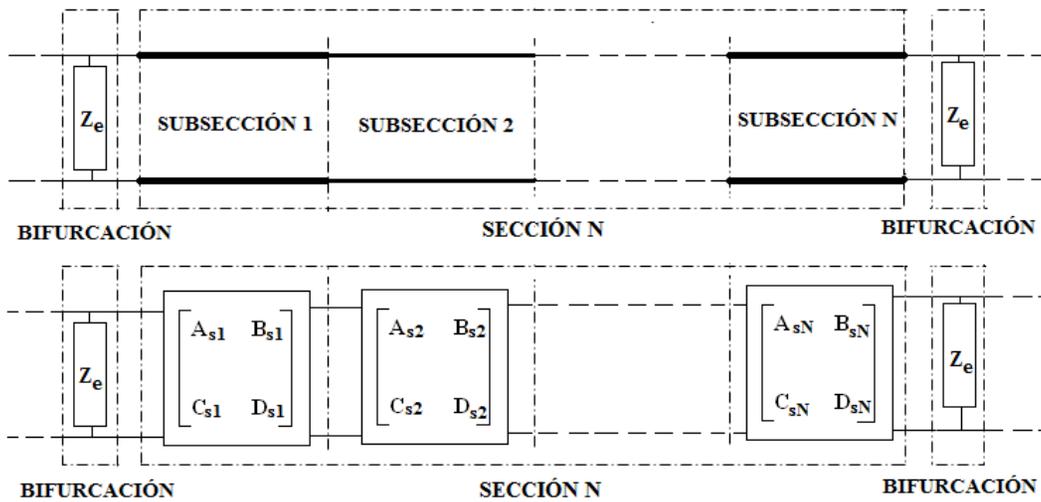


Figura 3.5 Obtención de la Matriz ABCD entre las bifurcaciones

Una vez que ya se tiene el circuito equivalente para la figura 3.3, se realiza de regla de la cadena y se obtiene la función de transferencia del canal mediante (2.5)

3.7 Mediciones y validación del modelo

Para validar el modelo, se llevaron a cabo mediciones en la línea eléctrica del laboratorio de Compatibilidad Electromagnética que presenta la topología mostrada en la figura 2.10.

Esta línea simula una red eléctrica doméstica a la cual se le conectan diversas cargas para observar el comportamiento de la Función de Transferencia. Las mediciones de la Función de Transferencia se llevaron a cabo entre los contactos Tx y Rx,

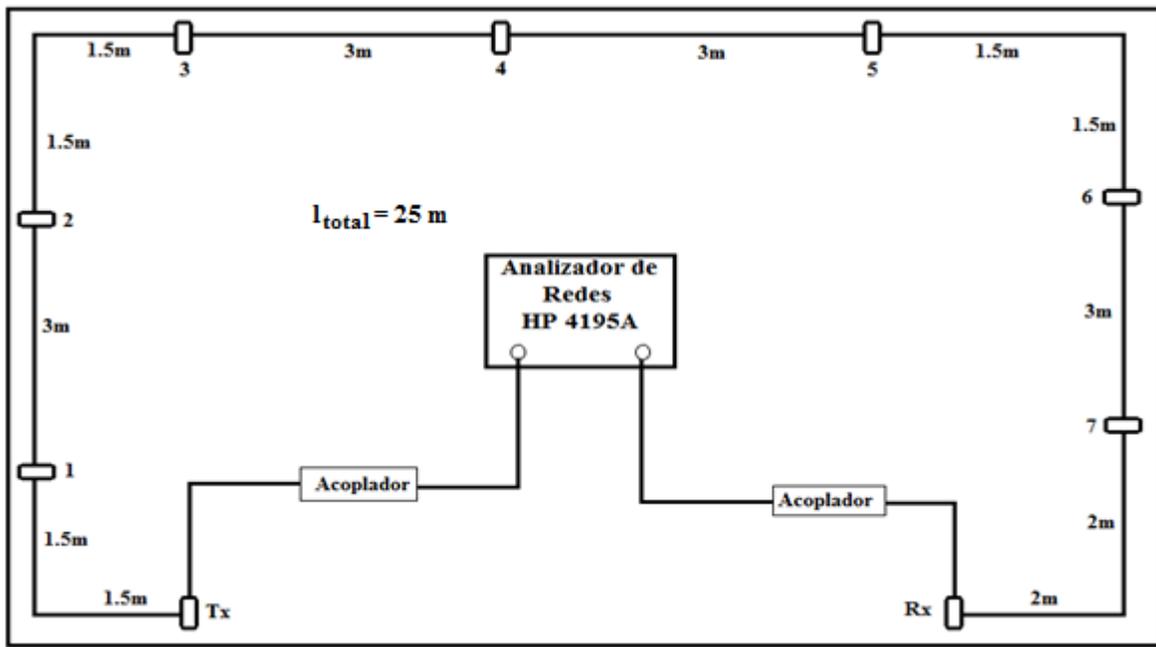


Figura 2.10 Topología de la línea eléctrica usada en las mediciones

Esta línea tiene las mismas características que la línea en la cual se evaluaron los modelos del capítulo 2 y las cargas que se agregaran a esta también serán las mismas solo que en este caso la red es no uniforme.

Función de Transferencia de la línea sin bifurcaciones

Primero se realizó una comparación entre la medición obtenida de manera experimental en una línea no uniforme con el analizador de redes, el modelo teórico propuesto, y una línea uniforme (con las mismas propiedades físicas de la línea no uniforme) y los modelos de análisis para líneas uniformes sin bifurcaciones de I. C. Papaleonidopoulos y Parámetros T, los resultados de esta comparación se muestran en la figura 3.6.

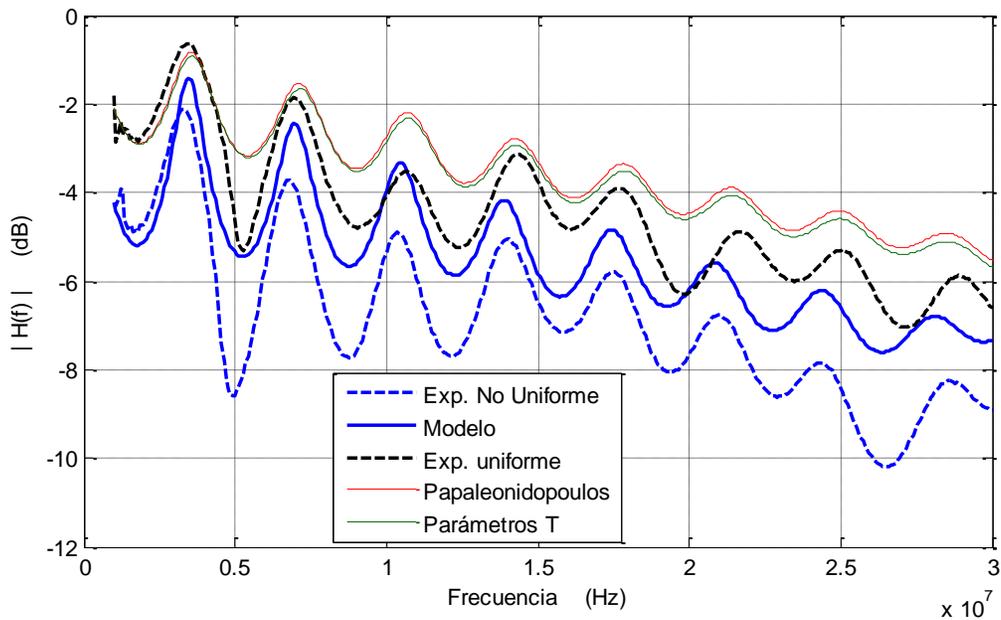


Figura 3.6 Comparativo entre la Función de Transferencia experimental uniforme y no uniforme, usando el modelo propuesto y los modelos de I.C Papaleonidopoulos y Parámetros T

De la figura 3.6 se observa que las Funciones de Transferencia experimentales uniforme y no uniforme presentan un comportamiento muy similar y que el principal efecto de la no uniformidad para la línea es la atenuación que esta función presenta con respecto a una línea uniforme además de un pequeño corrimiento en frecuencia.

En la figura 3.6 también se presentan los resultados aplicando los modelos para líneas uniformes y el modelo propuesto y se observa que los modelos uniformes presentan el mismo comportamiento que el de la función experimental uniforme, solo hay una pequeña variación en la atenuación y que los corrimientos en frecuencia son muy pequeños, casi imperceptibles y se dan en las altas frecuencia, pero cuando estos son comparados con la función experimental no uniforme y el modelo propuesto, este último tiene una mejor respuesta que los otros dos modelos ya que los niveles de atenuación de este son más cercanos al experimental que los otros dos y los corrimientos en frecuencia también son menores comparado con los modelos uniformes, lo cual valida que para obtener resultados más cercanos a la realidad es necesario tener en cuenta la no uniformidad de la línea.

Función de Transferencia de la línea con una bifurcación

Una vez que se ha comprobado que el modelo propuesto presenta resultados más cercanos al comportamiento real de una línea no uniforme, se agregara a la línea una bifurcación de dos metros de largo terminada en abierto; esta bifurcación se encuentra en el contacto 7 de la red no uniforme de la figura 2.10. En la siguiente figura se muestra un esquema simplificado de la línea con la bifurcación.

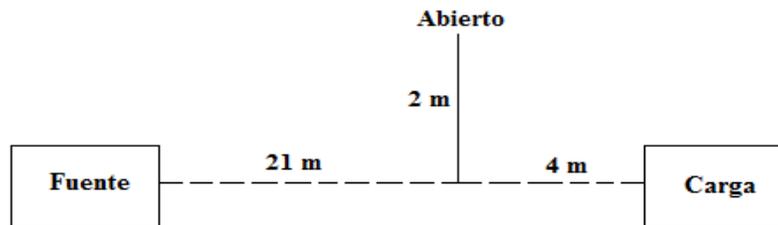


Figura 3.7 Línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.

Los resultados teórico y experimental de la función de transferencia de la línea de la figura 3.7 se muestran en la gráfica de la figura 3.8. Se observa que el modelo mantiene en general el mismo comportamiento que el de la función experimental y que solo hay un corrimiento en frecuencia y algunas variaciones en el nivel de atenuación de la línea que se hacen más notorias conforme aumenta la frecuencia.

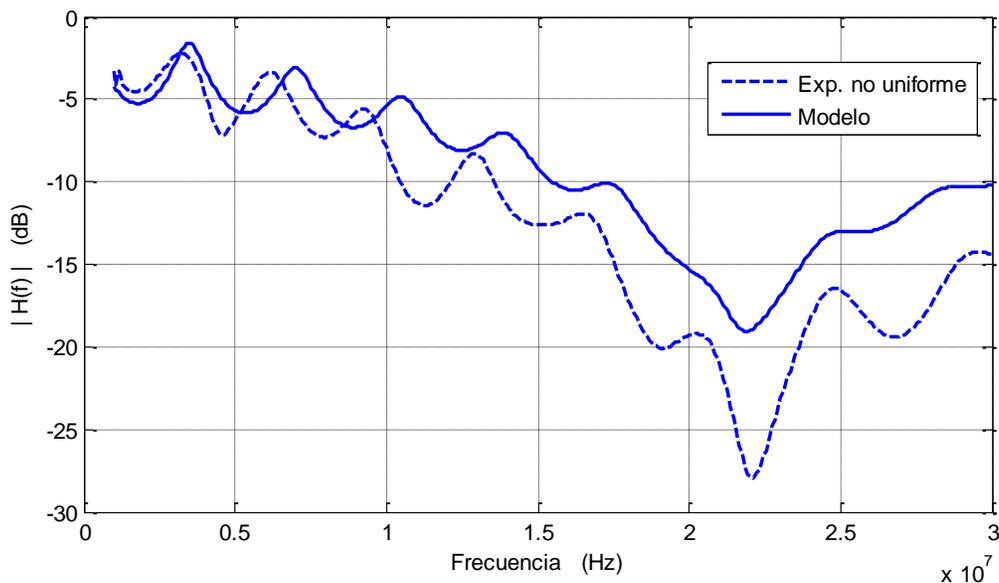


Figura 3.8 Función de Transferencia experimental y del modelo propuesto de la línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.

Función de Transferencia de la línea con varias bifurcaciones

En la figura 3.9 se muestra el esquema de la línea no uniforme con dos bifurcaciones, ambas terminadas en abierto y en la figura 3.10 se muestra la Función de Transferencia de esta, tanto la obtenida de manera experimental así como la del modelo teórico propuesto, nuevamente vemos que la Función de Transferencia teórica presenta un comportamiento similar al obtenido experimentalmente.

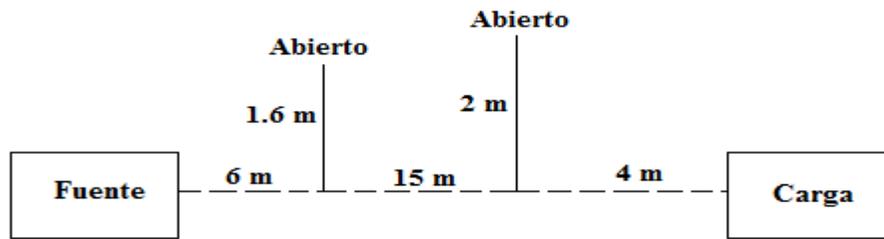


Figura 3.9 Línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.

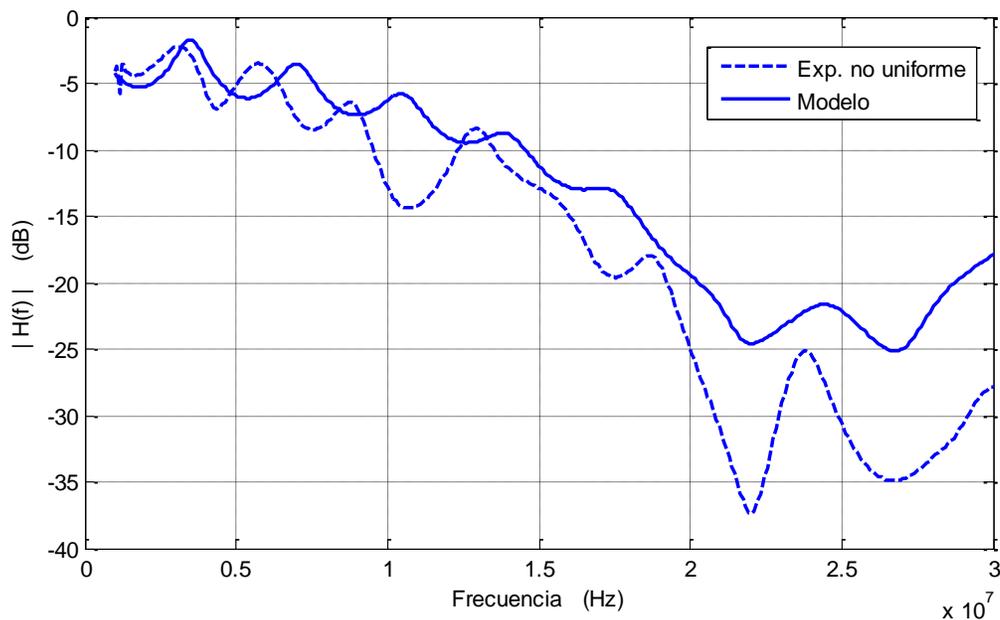


Figura 3.10 Funciones de transferencia de la línea, experimentales y teóricas de la línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.

En general el comportamiento del modelo con respecto a la línea se mantiene para diferentes topologías de la red. En las figuras 3.11-3.20 se observan las diferentes respuestas de la Función de Transferencia, experimentales y teóricas para cada una de sus

respectivas topologías, nuevamente las diferencias que se observan son en la atenuación y un corrimiento en frecuencia de la función teórica con respecto a la experimental.

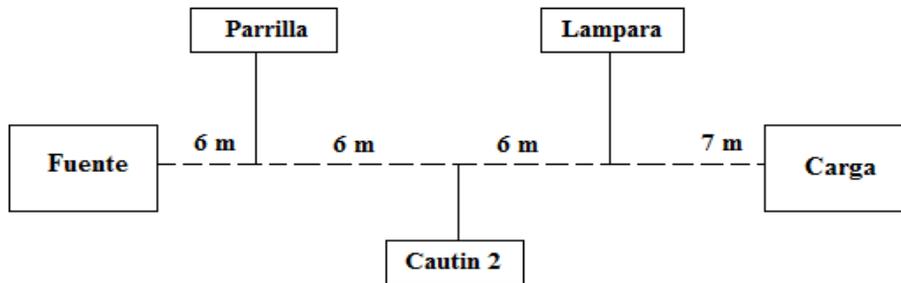


Figura 3.11 Línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones

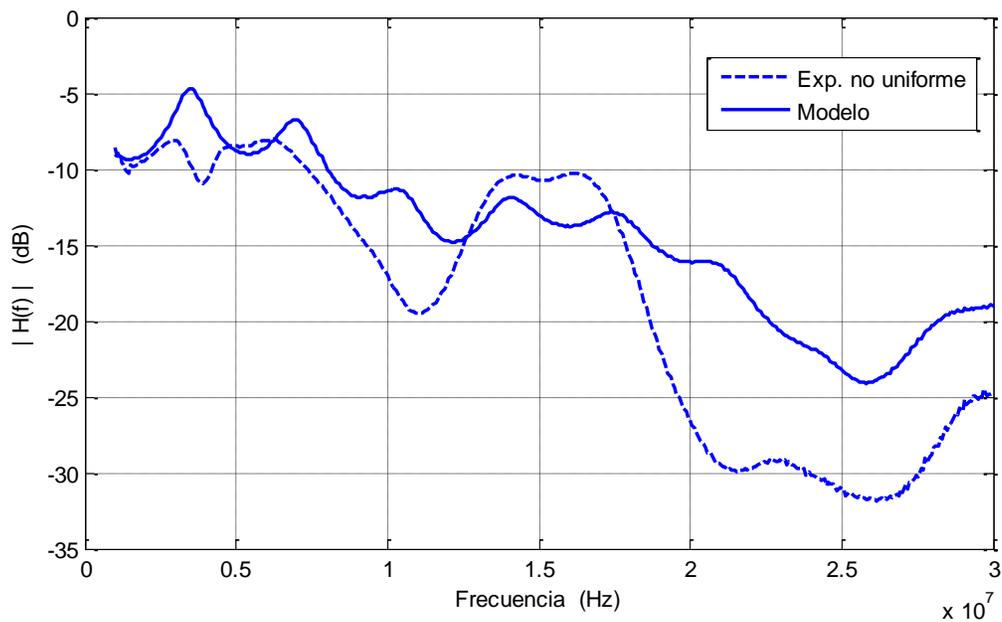


Figura 3.12 Funciones de transferencia, experimental y teóricas, de la línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones.

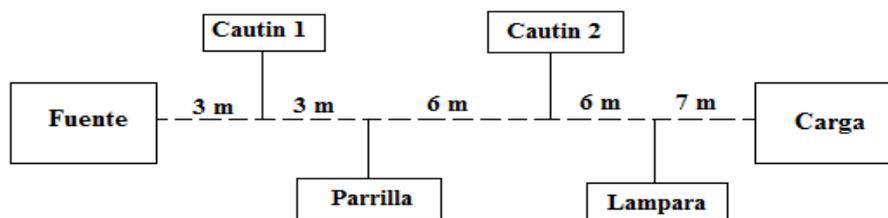


Figura 3.13 Línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones

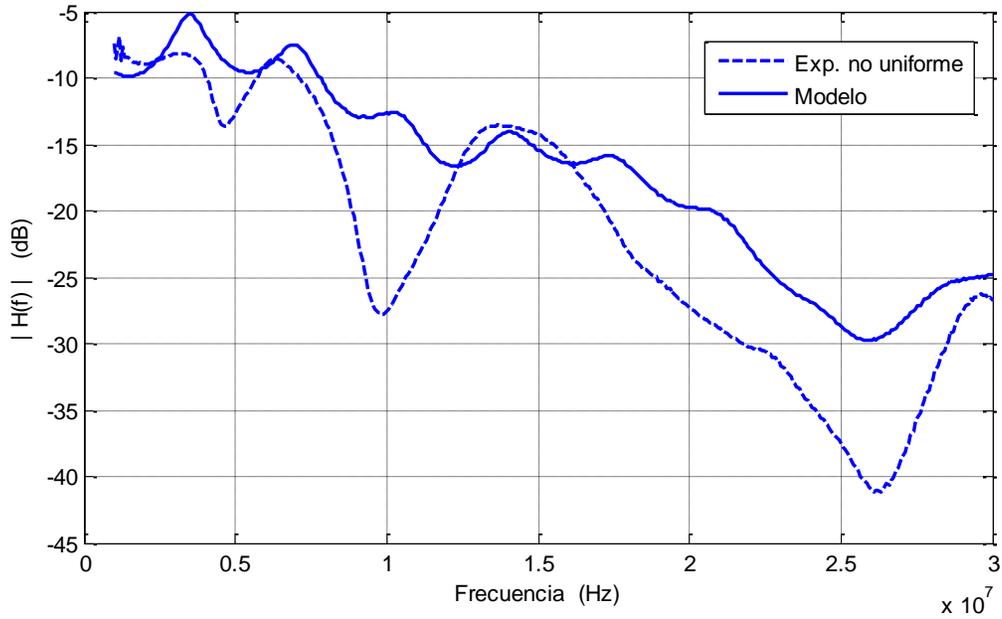


Figura 3.14 Funciones de Transferencia de la línea teóricas y experimentales de la línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones.

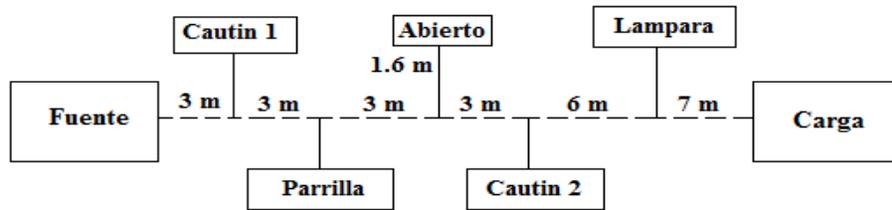


Figura 3.15 Línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones

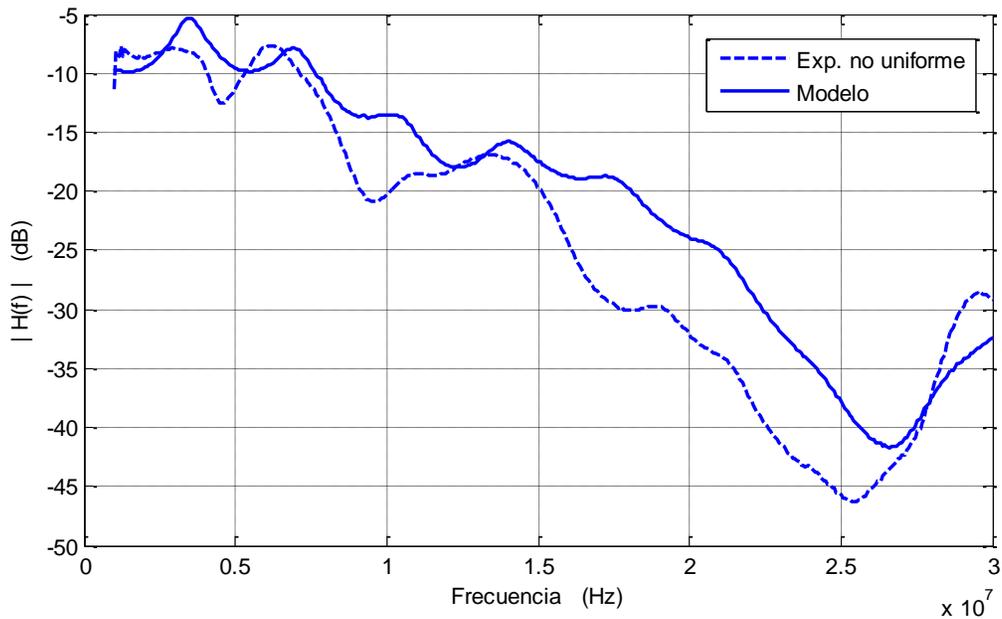


Figura 3.16 Funciones de Transferencia teórica y experimental de la línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones

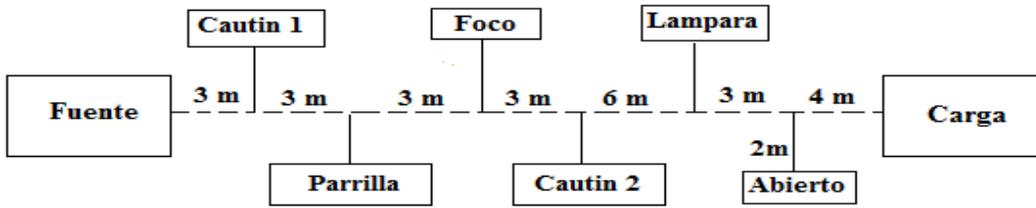


Figura 3.17 Línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones

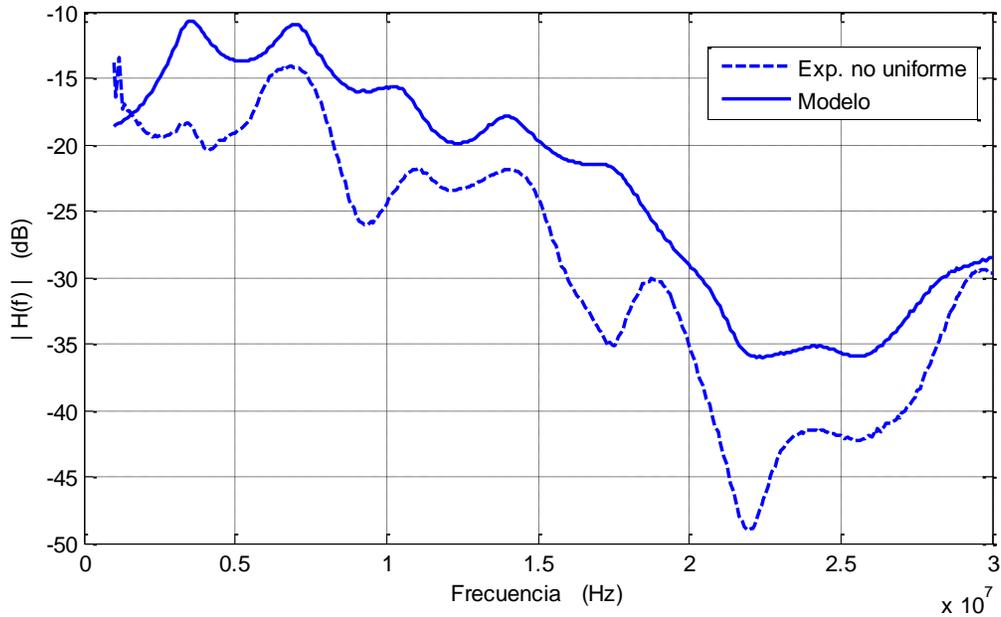


Figura 3.18 Funciones de Transferencia experimental y teórica de la línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones.

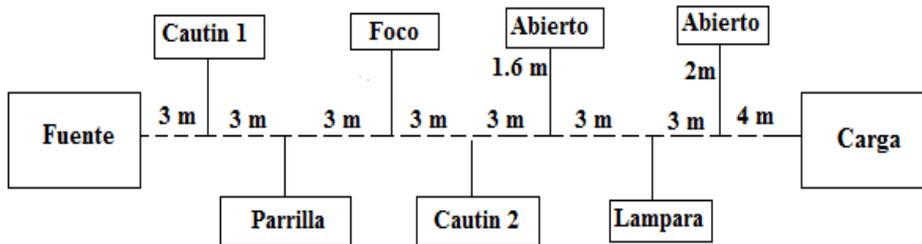


Figura 3.19 Línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones

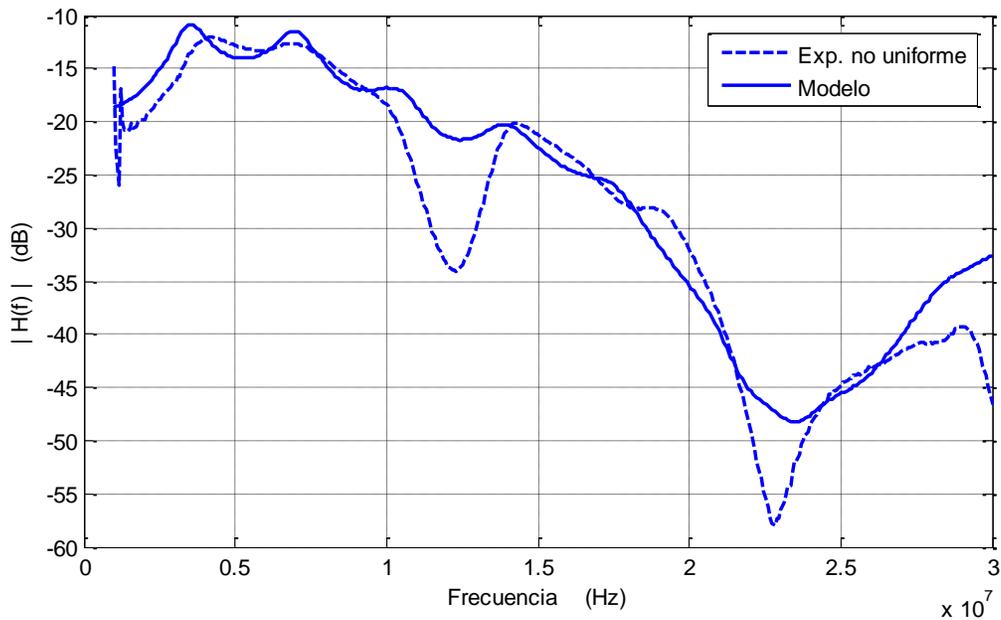


Figura 3.20 Funciones de Transferencia experimental y teórica de la línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones.

Prueba experimental de simetría del canal

Para demostrar que la línea cumple con el teorema de simetría, visto en 3.4, se realizaron diversas mediciones en donde se mantuvieron las bifurcaciones y sus cargas sin alterar, solamente se intercambiaron de lugar la fuente y la carga (esto se realizó en todas las redes mostradas anteriormente), aquí solo se presenta una de ellas ya que las demás presentan resultados, con respecto a la simetría, similares a esta; la topología de la red usada para la medición que aquí se presenta es la que se muestra en la figura 3.21 y los resultados se muestran en la figura 3.22.

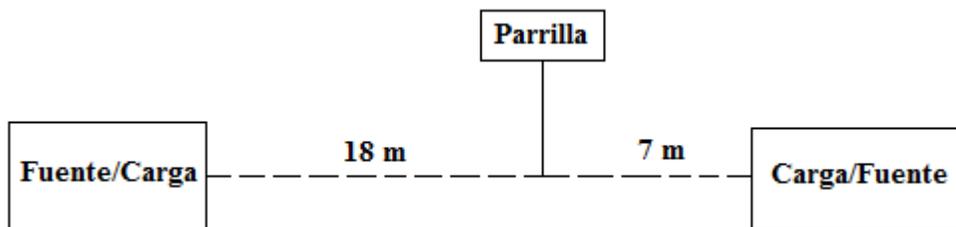


Figura 3.21 Línea no uniforme de 25 m con una bifurcación, a la cual se le intercambian de lugar la fuente y la carga

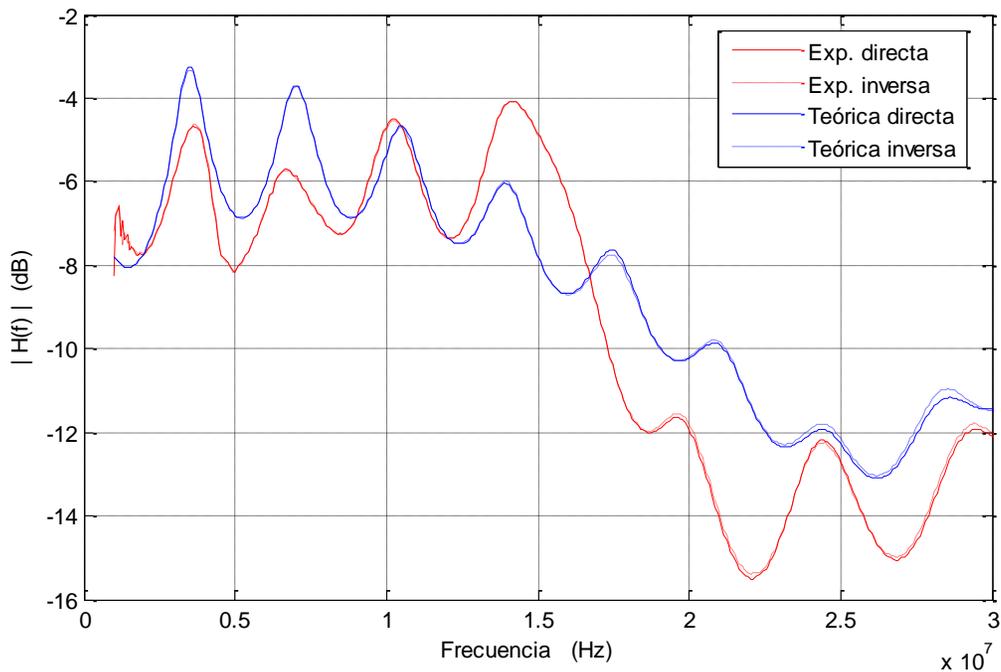


Figura 3.22 Funciones de Transferencia de la línea no uniforme de 25 m con una bifurcación a la cual se le intercambiaron de lugar la fuente y la carga.

Se ha demostrado de forma experimental, figura 3.22, que la red eléctrica como medio de comunicación presenta simetría, es decir, es un canal de comunicación estable lo cual es deseable. Debido a que en todo sistema de comunicación en cualquier momento el transmisor (Fuente) se convertirá en receptor (Carga) y viceversa, el receptor en transmisor; es necesario que el canal sea estable o simétrico, en el sentido de que se presente la misma respuesta en su Función de Transferencia en los dos sentidos en los que se dará la comunicación ya que esta bidireccionalidad en la operación de la señal de transmisión-recepción permitirá un alto nivel de estabilidad en la transferencia de información.

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan las Funciones de Transferencia obtenidas mediante los modelos presentados en el capítulo 2 y se comparan con las obtenidas experimentalmente en la línea no uniforme, capítulo 3, esto con la finalidad de demostrar que, al considerar la no uniformidad de la línea, en el modelo propuesto se presentaran mejores resultados que en los demás modelos.

También se presentan los efectos que tiene la no uniformidad de la línea sobre la red y como es que varían los resultados de manera experimental con respecto a una red uniforme.

4.2 Evaluación de los modelos sin bifurcaciones

Las Funciones de Transferencia para un canal sin bifurcaciones uniforme y no uniforme fueron discutidas en el capítulo anterior, figura 3.6. A continuación se presentan los resultados que se obtienen al comparar las Funciones de Transferencia teóricas con la experimental, mediante el coeficiente de correlación r , y el valor $rmse$ entre las funciones de todos los modelos y la experimental, tabla 4.1.

Línea sin bifurcaciones					
Papaleonidopoulos		Parámetros T		Modelo	
r	$rmse$	r	$rmse$	r	$rmse$
0.9234	3.4199	0.8804	3.3114	0.8877	1.5400

Tabla 4.1 Comparativo entre los modelos para líneas sin bifurcaciones

Puede decirse que el modelo que presenta mejores resultados, es el propuesto, ya que aunque todos presentan una buena correlación entre el modelo y la función experimental, el modelo propuesto presenta un valor $rmse$ más bajo que los otros dos.

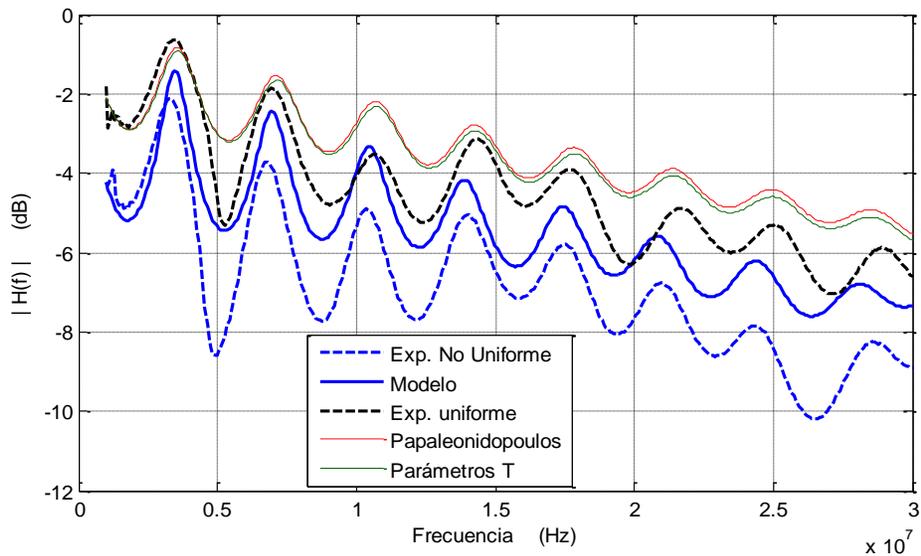


Figura 3.6. Comparativo entre la Función de Transferencia experimental uniforme y no uniforme, usando el modelo propuesto y los modelos de I.C Papaleonidopoulos y Parámetros T

4.3 Evaluación de los modelos con bifurcaciones

Para una línea no uniforme con una bifurcación, figura 3.7, se realizó una comparación de la función experimental con la que se obtiene usando las expresiones dadas anteriormente en los modelos: Zimmermann (2.10), Despina (2.15), Philipps modelo eco (2.18), H. Meng (2.27), Philipps modelo Circuito Resonante Serie (2.31), Parámetros T con bifurcaciones y línea uniforme (2.5), y el modelo propuesto. Todas estas Funciones de Transferencia se presentan en la figura 4.1.

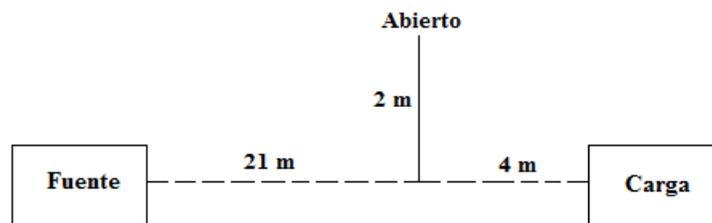


Figura 3.7 Línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.

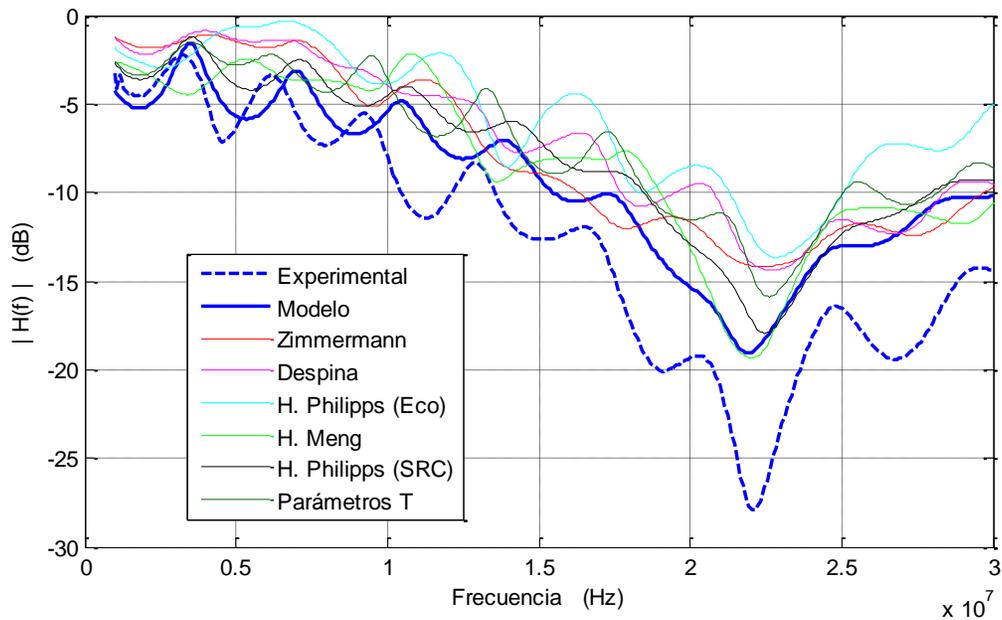


Figura 4.1 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes para una línea no uniforme de 25 m con una bifurcación de 2 m terminada en abierto.

Esta misma comparación se realizó para todas las topologías del capítulo anterior y los resultados se concentran en la tabla 4.2. En la figura 4.2 se comparan las Funciones de Transferencia obtenidas mediante los modelos uniformes con la obtenida mediante el modelo propuesto para una línea no uniforme con dos bifurcaciones, figura 3.9.

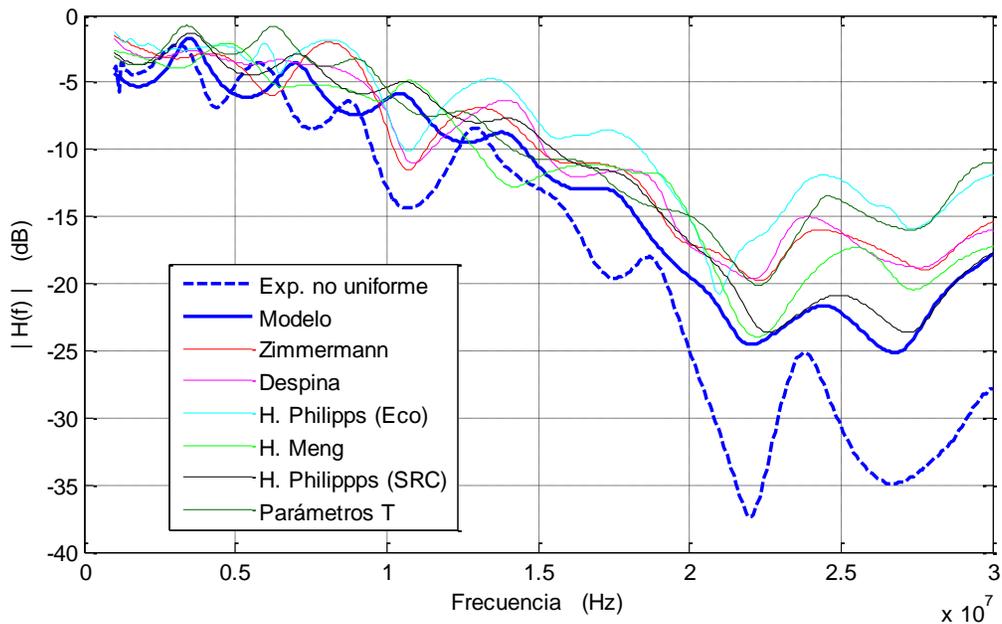


Figura 4.2 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto.

Se observa que en esta figura 4.2, que todos los modelos presentan de manera general el mismo comportamiento y que el modelo propuesto presenta una atenuación más cercana al comportamiento real de la línea, lo cual quiere decir que este presentará un valor *rmse* más bajo que los demás modelos, tabla 4.2.

En la figura 4.3 se presenta la comparación entre Funciones de Transferencia para una línea no uniforme con tres bifurcaciones terminadas con diferentes cargas, figura 3.11, puede verse de nueva cuenta que el modelo propuesto presenta mejores resultados que el resto de los modelos.

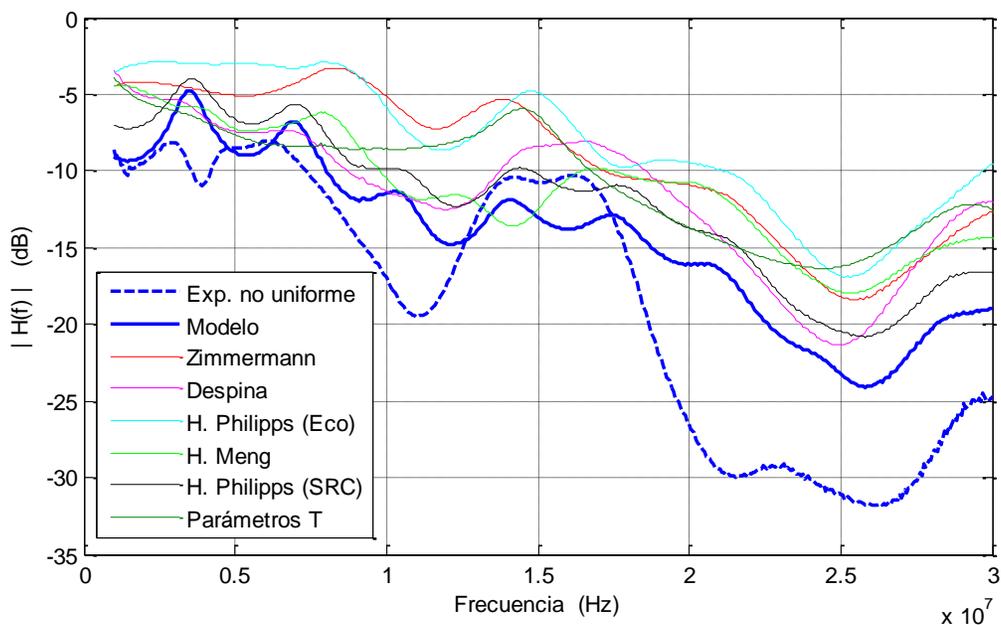


Figura 4.3 Funciones de Transferencia experimental, del modelo uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con tres bifurcaciones

La figura 4.4 vuelve a mostrar que el modelo propuesto presenta mejores resultados que los demás, se utilizó la red con cuatro bifurcaciones terminadas en carga, figura 3.13; y a partir de las figuras anteriores y de las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 que presentan las Funciones de Transferencia para redes no uniformes con cinco, seis y siete bifurcaciones respectivamente, figuras 3.15, 3.17 y 3.19; se concluye el modelo propuesto mejores resultados ya que se presentará un valor *rmse* más bajo, tabla 4.2.

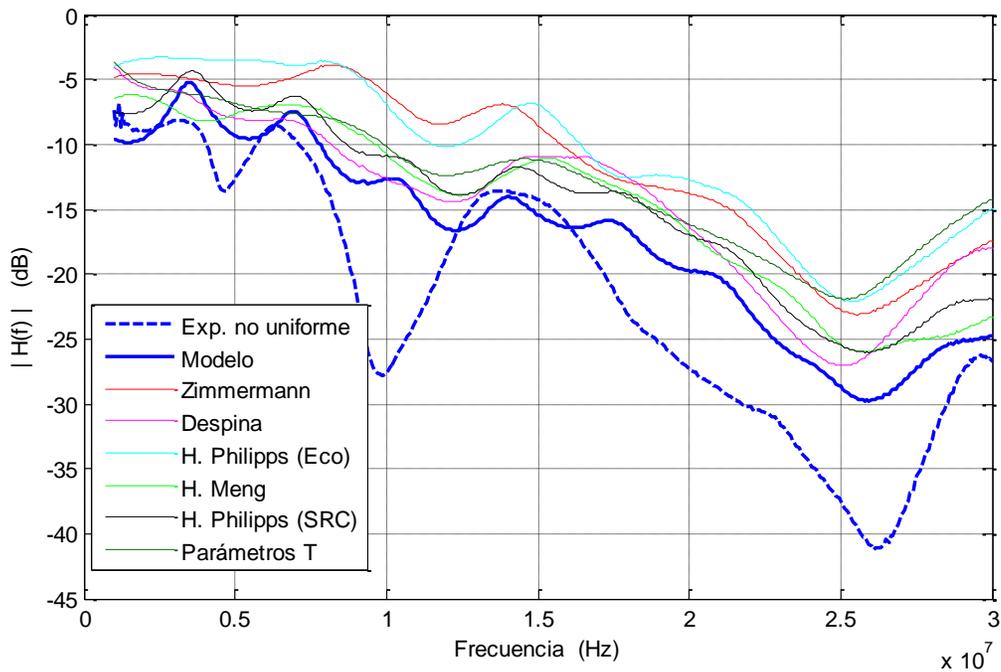


Figura 4.4 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con cuatro bifurcaciones

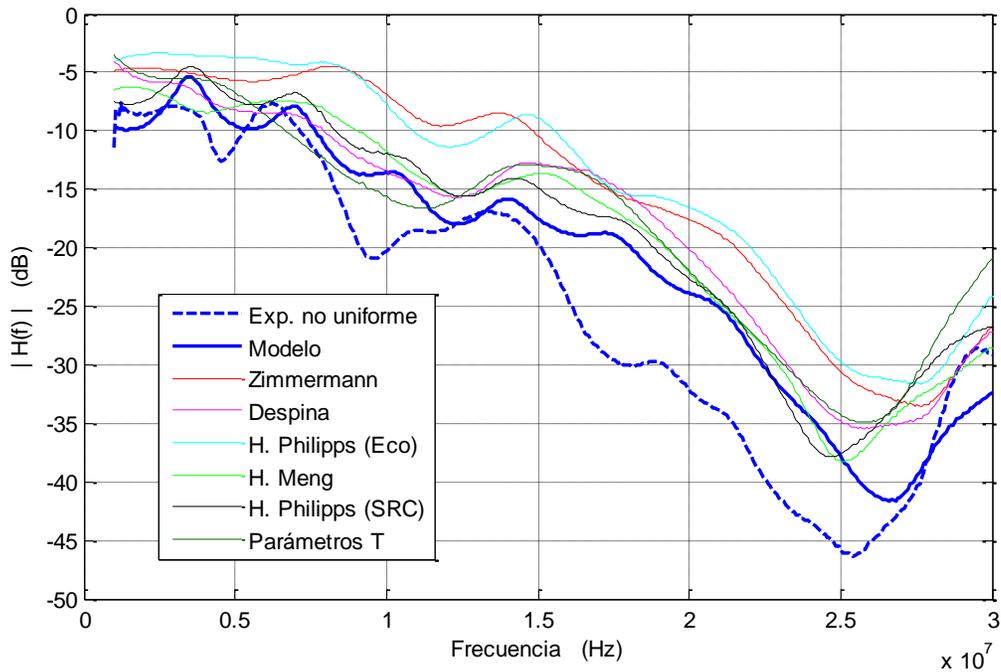


Figura 4.5 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con cinco bifurcaciones

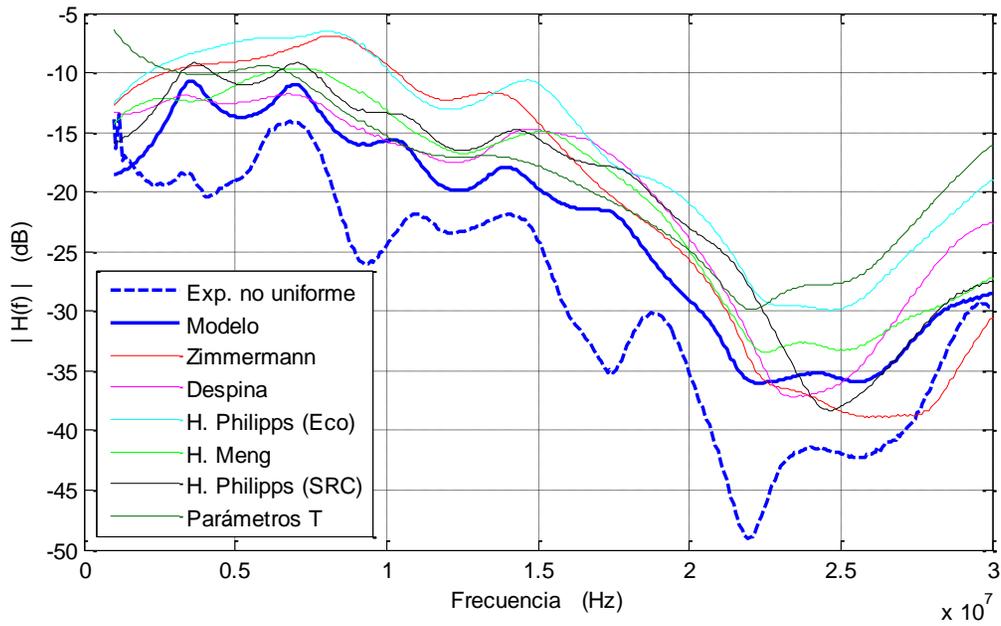


Figura 4.6 Funciones de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con seis bifurcaciones

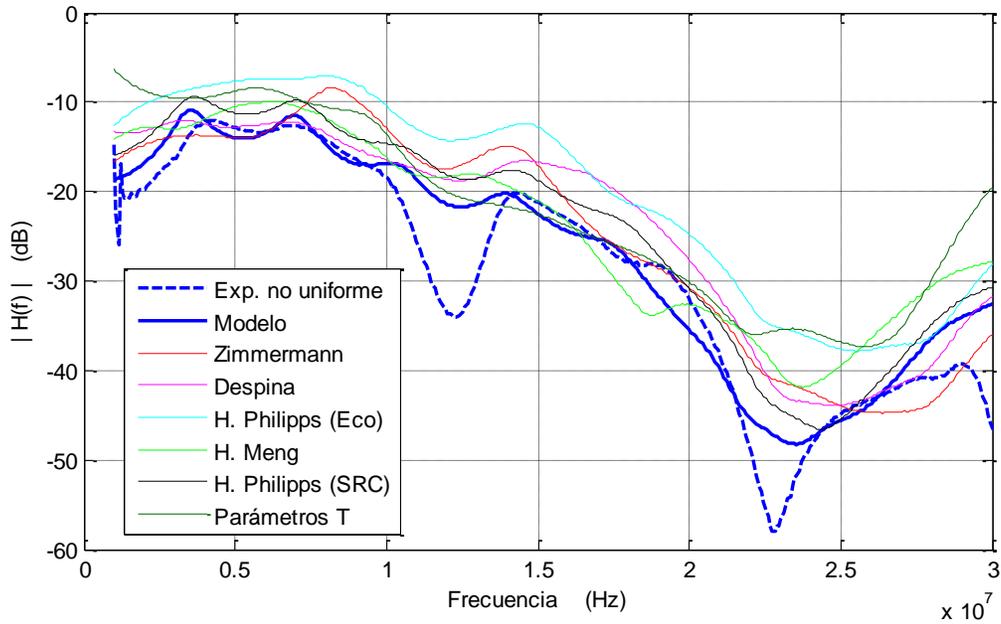


Figura 4.7 Funciones. de Transferencia experimental, del modelo no uniforme y las obtenidas por los modelos uniformes, para la línea no uniforme de 25 m con siete bifurcaciones

4.4 Análisis de resultados para el canal no uniforme.

Línea con varias bifurcaciones												
No. de bifu	H. Philipps (SRC)		H. Meng		H. Philipps (Eco)		Despina		Zimmermann		Parámetros T	
	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>Rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>	<i>r</i>	<i>rmse</i>
1	0.9549	5.3486	0.9141	5.3385	0.8989	7.7674	0.9583	6.2604	0.9332	5.6009	0.9656	6.1519
2	0.9699	7.2284	0.9439	8.0945	0.9471	10.8833	0.9769	8.8841	0.9634	8.8824	0.9212	10.1229
3	0.9240	7.9001	0.8219	9.4634	0.9112	11.5329	0.9182	8.4514	0.9060	10.4524	0.9301	9.7652
4	0.9272	8.5429	0.9139	8.5883	0.9270	12.1631	0.9446	8.5660	0.9047	11.5131	0.9279	10.5300
5	0.9723	7.0006	0.9541	7.2757	0.9338	11.4799	0.9364	8.0922	0.9215	10.8690	0.9609	7.9748
6	0.8865	9.8124	0.9292	9.5834	0.9445	13.0630	0.9159	9.3637	0.9052	9.8753	0.9536	11.2060
7	0.9526	6.0401	0.9051	7.3889	0.9396	9.9711	0.9426	6.4410	0.9190	6.3874	0.8905	8.9457

Línea con varias bifurcaciones		
No. de Bifu	Modelo	
	<i>r</i>	<i>rmse</i>
1	0.9593	4.1841
2	0.9685	6.1482
3	0.9278	4.5464
4	0.9242	6.3590
5	0.9429	5.6409
6	0.9480	6.7785
7	0.9523	4.3142

Tabla 4.2 Comparativo entre los diversos modelos

En la tabla 4.2 se concentran los resultados de comparar todos los modelos en varias topologías con sus respectivas funciones experimentales, puede verse que todos presentan factores de correlación muy buenos; esto debido a que en general el comportamiento de la línea se mantiene, su principal variación es en la atenuación, y el modelo que presenta mejores valores *rmse* en todos los casos es el propuesto, lo cual vuelve a confirmar que para obtener Funciones de Transferencia más cercanas al valor real de la línea es necesario tener en consideración su no uniformidad ya que aunque los otros modelos describen de buena forma un canal PLC uniforme cuando estos se aplican a líneas no uniformes su desempeño es menor.

4.5 Efecto de la no uniformidad de la línea

Esta sección presenta las diferencias de manera experimental entre una línea uniforme y no uniforme, las topologías de la línea son las mismas que en los casos anteriores. En las figuras 4.8 – 4.15 se presentan los resultados de todas las mediciones, y en la tabla 4.3 se concentran los resultados de las diferencias que hay entre las Funciones de Transferencia experimental uniforme y no uniforme, estas diferencias se midieron por medio del valor de correlación r , entre la función uniforme y la no uniforme; y el valor $rmse$ que hay entre estas.

La figura 4.8 presenta las Funciones de Transferencia, uniforme y no uniforme, para una línea sin bifurcaciones, a partir de esta se observa que el principal efecto que tiene la no uniformidad de la línea sobre la Función de Transferencia es en la atenuación que esta presenta. Para una línea no uniforme la atenuación será mayor. Además del efecto de la atenuación puede verse que existen ciertos desfasesamientos que se dan en las frecuencias más altas debidos a la no uniformidad de la línea.

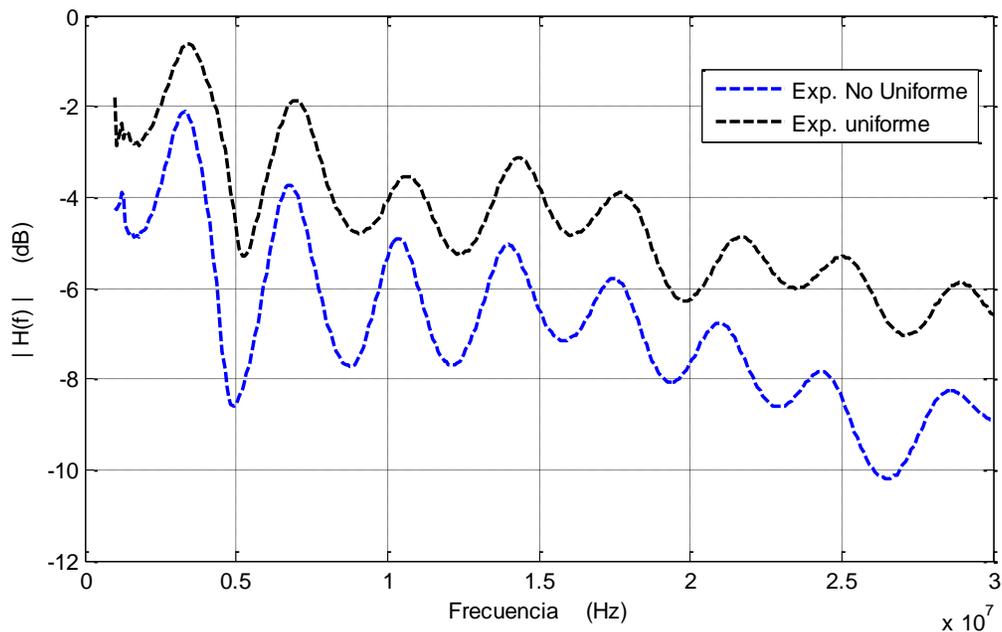


Figura 4.8 Funciones de Transferencia experimentales para una línea sin bifurcaciones, uniforme y no uniforme

De las figuras 4.9 - 4.11, las cuales presentan los resultados para la línea cuando esta tiene bifurcaciones, de una a siete respectivamente; puede concluirse lo mismo que para la línea no uniforme; el principal efecto que tiene la no uniformidad sobre la Función de Transferencia es la atenuación que esta presenta con respecto a una uniforme, existe una mayor atenuación en líneas no uniformes, ya que de manera general el comportamiento de estas funciones se mantiene, solo se presentan ligeras variaciones. Esto puede verse mediante el factor de correlación r , y el valor $rmse$ que hay entre la función no uniforme y la uniforme, Tabla 4.3,

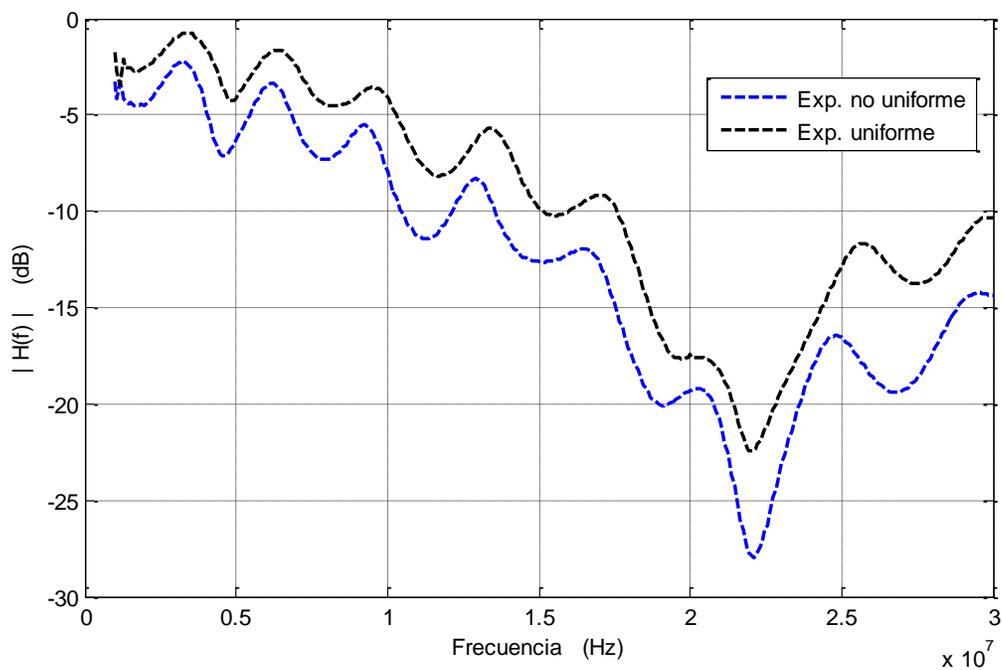


Figura 4.9 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con una bifurcación de 2 m terminada en abierto, uniforme y no uniforme

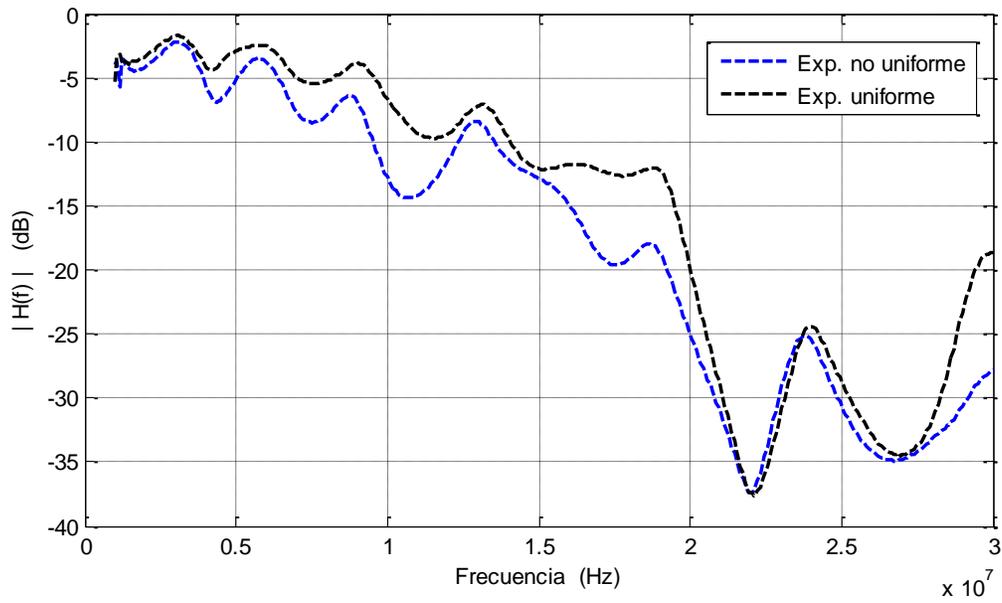


Figura 4.10 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con dos bifurcaciones de 1.6 m y 2 m terminadas en abierto, uniforme y no uniforme

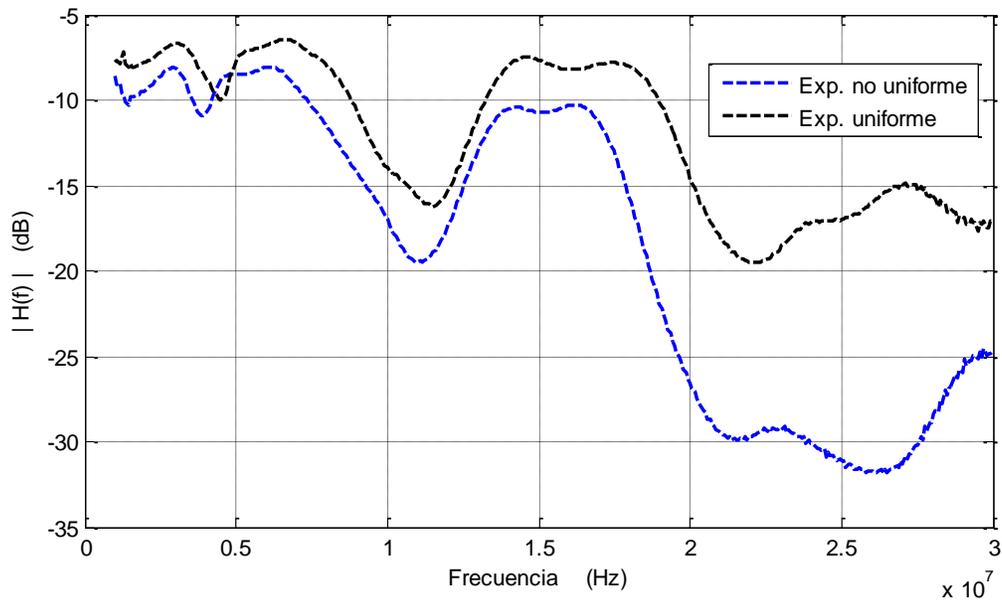


Figura 4.11 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con tres bifurcaciones, uniforme y no uniforme

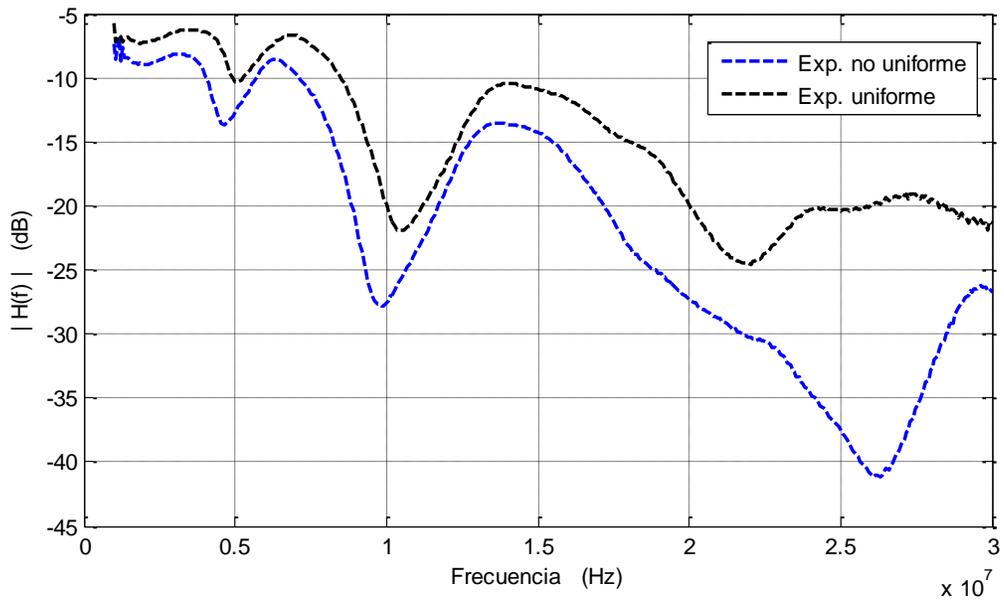


Figura 4.12 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con cuatro bifurcaciones, uniforme y no uniforme

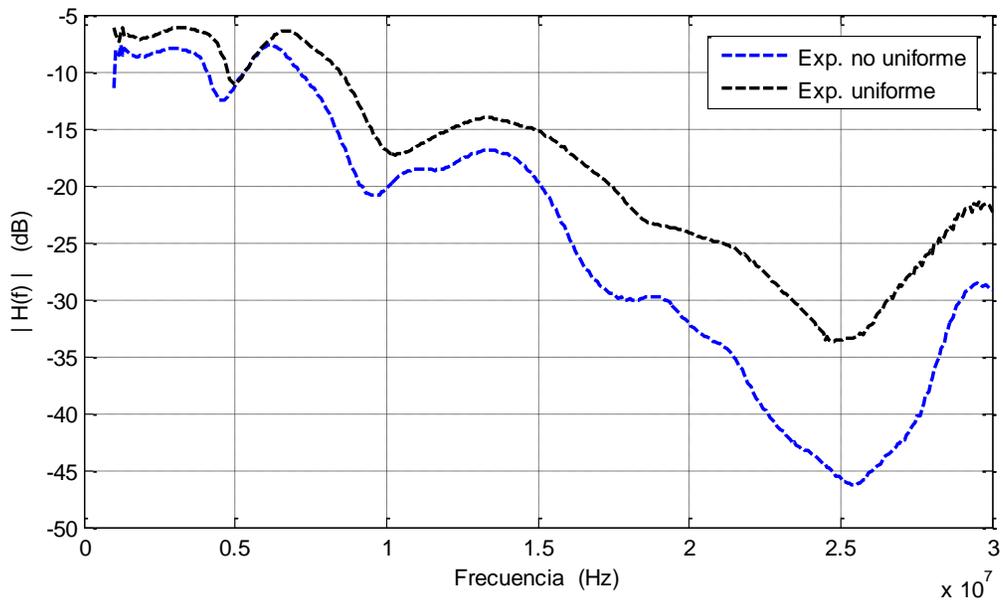


Figura 4.13 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con cinco bifurcaciones, uniforme y no uniforme

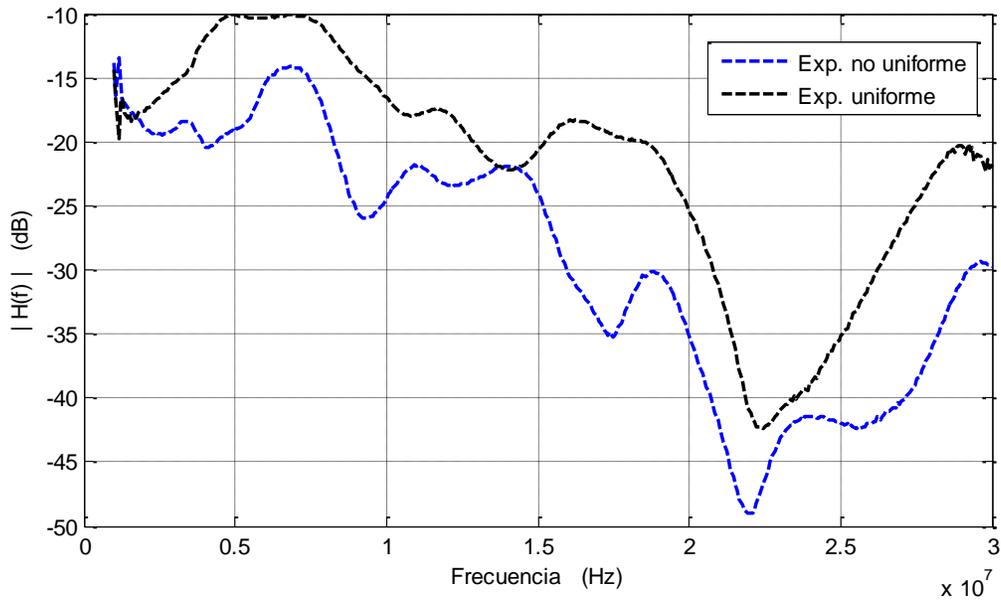


Figura 4.14 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con seis bifurcaciones, uniforme y no uniforme

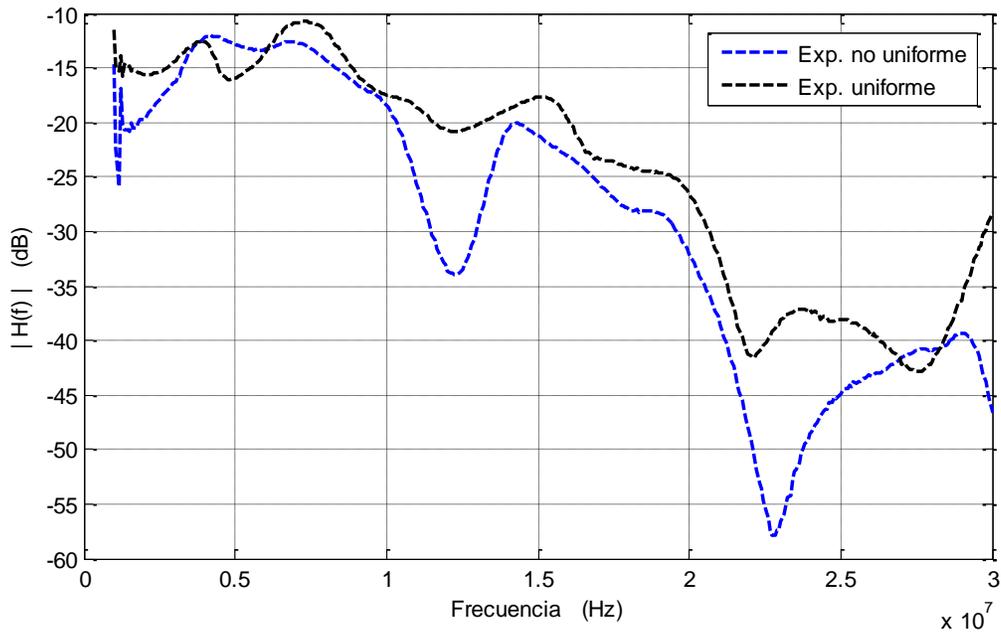


Figura 4.15 Funciones de Transferencia experimentales para una línea con siete bifurcaciones, uniforme y no uniforme

Diferencias entre las funciones experimentales								
No. de bifu.	---	1	2	3	4	5	6	7
<i>r</i>	0.9268	0.9819	0.9754	0.9117	0.8913	0.9892	0.9002	0.9389
<i>rmse</i>	2.4534	3.5416	3.6574	8.2053	8.7168	7.6289	8.4499	6.4091

Tabla 4.3 Resultados de comparar las funciones de Transferencia uniformes y no uniformes

De la Tabla 4.3 se observa que la línea uniforme y no uniforme presentarán factores de correlación muy parecidos para todos los casos y que la diferencia en la atenuación que se presenta en con o sin bifurcaciones aumenta conforme se agreguen cargas a la red, aunque el incremento no será de forma lineal. Se puede dejar como trabajo a futuro encontrar por medio de la medición en otras topologías si la atenuación de una línea no uniforme con respecto a una uniforme se incrementa con el número de bifurcaciones.

4.6 Consideraciones sobre la no uniformidad y el número de secciones.

Los datos de las mediciones anteriores se obtuvieron en una instalación eléctrica controlada, es decir, se conocía la geometría que esta presentaba a todo lo largo (la longitud y la separación entre conductores para cada una de las secciones era un valor conocido); como se ha mencionado anteriormente en las instalaciones eléctricas domesticas esto es imposible de conocer, es por eso que se propone obtener la Función de Transferencia de estas redes mediante el procedimiento descrito en el capítulo 3.5 (en el apéndice D.8 se tiene el diagrama de flujo de este procedimiento).

Debido a que en este procedimiento el número de secciones y separación entre conductores se asignara de forma aleatoria cada vez que se aplique este se obtendrán resultados diferentes, pero de manera general el comportamiento de esta Función de Transferencia resultante será similar al que se obtenga de manera experimental.

En la figura 4.16 se comparan los resultados obtenidos, el que se obtiene cuando se conoce el número y geometría de la línea y el del procedimiento. En la Figura 4.16 puede verse que el mejor resultado se obtendrá cuando se conoce como está distribuida la línea y que no se podrá obtener un mejor resultado que este ya que el procedimiento del capítulo 3.5 solo da aproximaciones al comportamiento real de la línea.

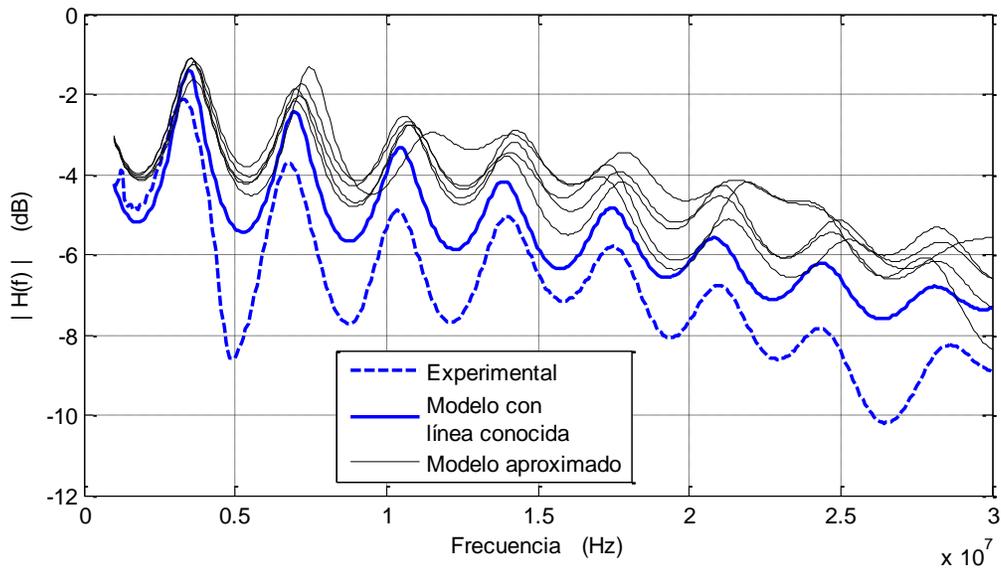


Figura 4.16 Comparativo entre los resultados obtenidos en una línea sin bifurcaciones experimentalmente, usando el modelo cuando se conoce la distribución de la línea y aplicando el procedimiento descrito en 3.5.

En los resultados mostrados en la figura 4.16 el número de secciones y la separación entre ellas fue diferente cada vez y con la finalidad de ver como varia el factor de correlación r , y el valor $rmse$ en función de la longitud de las secciones, se aplicó el modelo aproximado manteniendo fija la longitud de la sección (solo se cambió la distancia entre conductores); en la tabla 4.4 se concentran los resultados de cinco realizaciones del modelo aproximado para tres longitudes diferentes de sección, 2.5 m, 25.0 cm y 5.0 cm; y en las figuras 4. 17 – 4.19 se muestran los resultados para las diferentes longitudes.

$l = 2.5 \text{ m}$		$l = 25.0 \text{ cm}$		$l = 5.0 \text{ cm}$	
r	$rmse$	r	$rmse$	r	$rmse$
0.7919	2.9356	0.8617	2.1427	0.8858	2.6529
0.7324	2.5940	0.8628	2.5948	0.8959	2.5086
0.7796	2.5515	0.8887	2.2328	0.8703	2.6082
0.7814	2.5764	0.8893	2.6348	0.8911	2.5499
0.8394	2.4239	0.8670	2.6437	0.9235	2.4478

Tabla 4.4 Resultados de cinco realizaciones del modelo con diferentes longitudes de sección fija

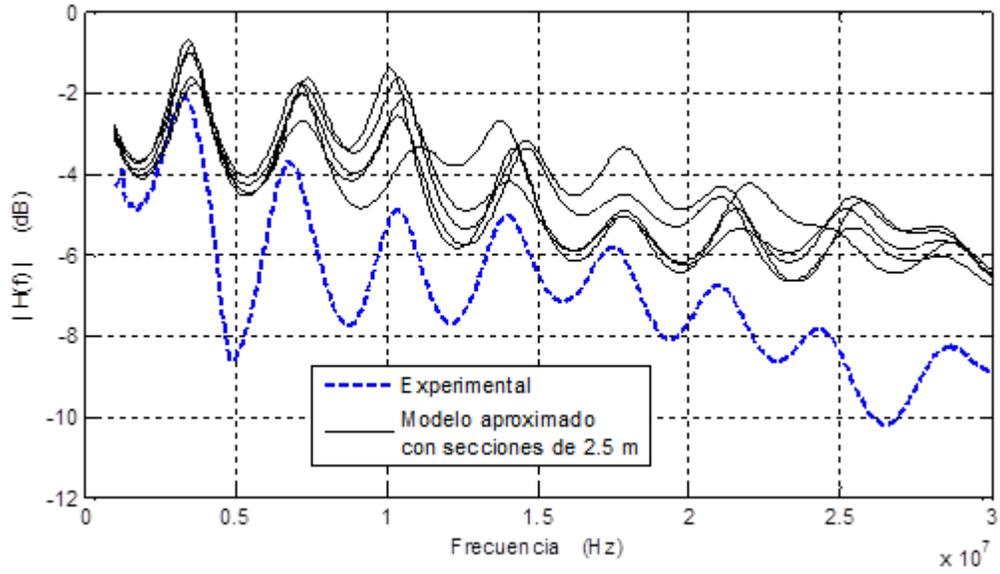


Figura 4.17 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 2.5 m de longitud.

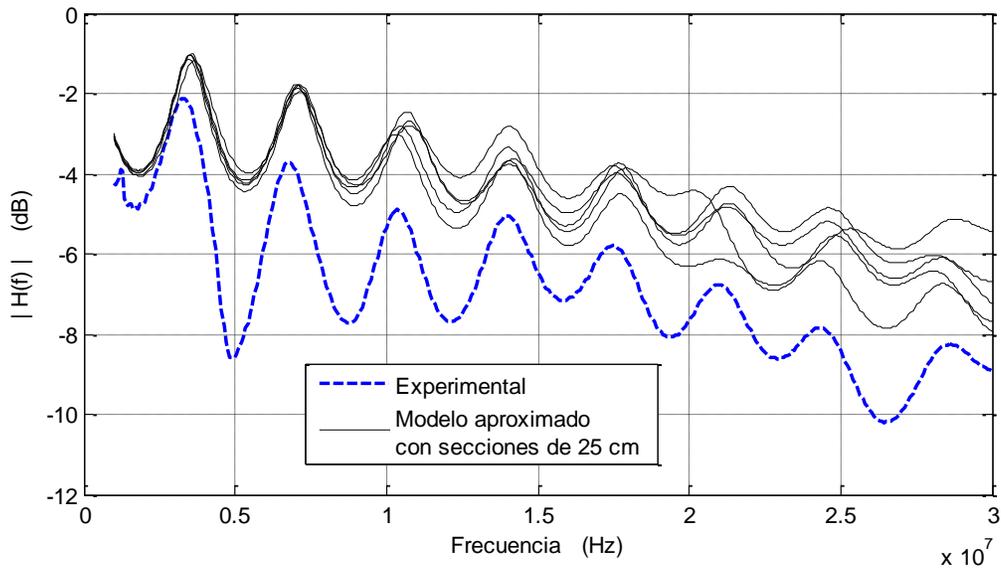


Figura 4.18 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 25 cm de longitud.

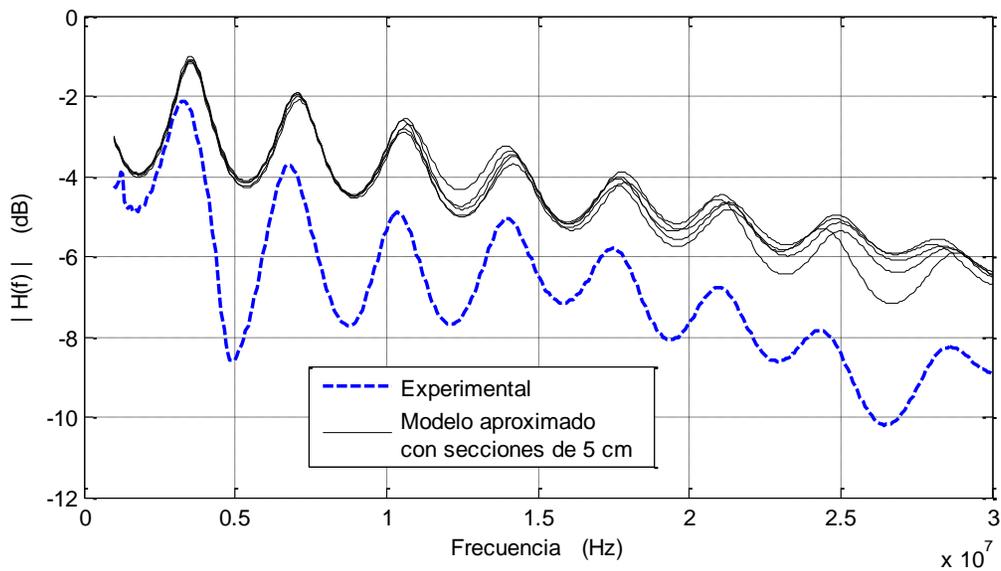


Figura 4.19 Resultados para la línea sin bifurcaciones usando el modelo aproximado con secciones de 5 cm. de longitud.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 4.4 y figuras 4.17- 4.19 puede decirse que si en el modelo aproximado la longitud de las secciones de la línea es de solo unos centímetros las formas de las Funciones de Transferencia resultantes serán más parecidas al comportamiento real de la línea, el factor de correlación r será mejor; mientras que si la longitud de estas secciones está en el orden unos pocos metros las formas resultantes del modelo aproximado tenderán a ser más diferentes entre la experimental y entre ellas, el factor de correlación r será más bajo.

Dado que el modelo aproximado otorga resultados diferentes cada vez que este se use, se aplicó este modelo cien veces para diferentes longitudes de sección, se promediaron los factores de correlación r y los valores de error $rmse$ de estas realizaciones esto con el fin de tener más datos acerca del comportamiento del modelo con diferentes longitudes de sección. En la tabla 4.5 se concentran los datos obtenidos.

En la figura 4.20 se muestra en una gráfica como varían el factor de correlación y el $rmse$ de las realizaciones en función de la longitud para cada sección y puede verse que entre mayor sea la longitud de la sección el factor de correlación será menor pero el valor $rmse$ disminuirá cuando la longitud de las secciones es mayor.

<i>long</i>	2.5 m	1.25m	65.5 cm	50 cm	35.7 cm	25 cm	20.8 cm	15.6 cm	12.5 cm	10.86 cm	10 cm
<i>r</i>	0.7811	0.7810	0.8244	0.8377	0.8499	0.8626	0.8658	0.8773	0.8821	0.8868	0.8871
<i>rmse</i>	2.4740	2.4167	2.4826	2.4711	2.4885	2.5075	2.5082	2.5541	2.5557	2.5538	2.4575
<i>long</i>	9.25 cm	8.92 cm	8.62 cm	8.06 cm	7.81 cm	7.35 cm	6.94 cm	6.57cm	6.25cm	6.09 cm	5 cm
<i>r</i>	0.8850	0.8878	0.8872	0.8894	0.8875	0.8910	0.8929	0.8909	0.8926	0.8914	0.8955
<i>rmse</i>	2.5807	2.5619	2.5642	2.5494	2.5571	2.5660	2.5580	2.5719	2.5610	2.5717	2.5757

Tabla 4.5 Factores de correlación y valores *rmse* del modelo aproximado con diferentes longitudes de sección.

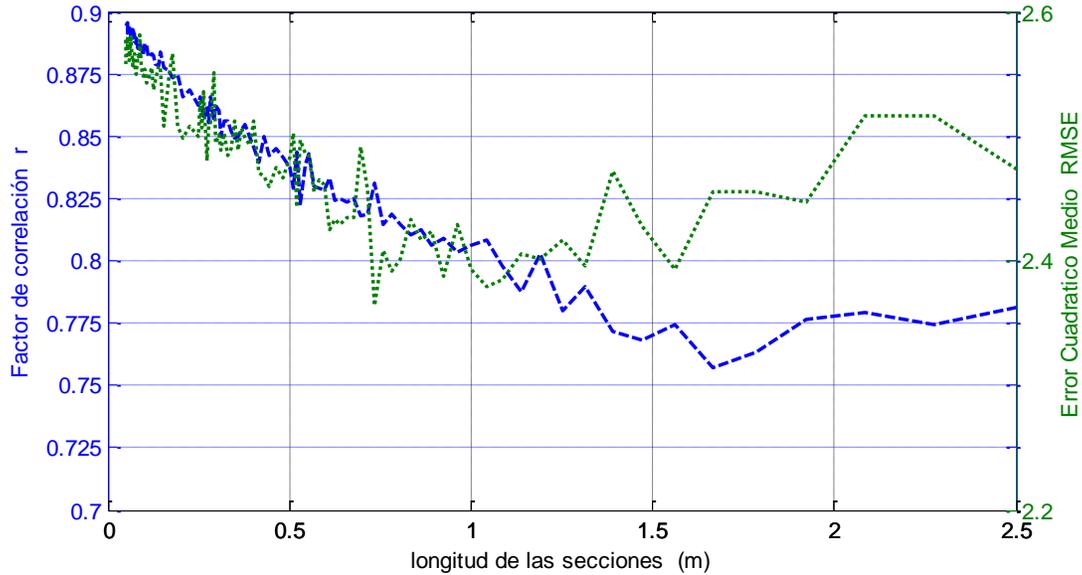


Figura 4.20 Factor de correlación y error cuadrático medio en función de la longitud las secciones

A pesar de que el modelo aproximado otorga valores aleatorios de la Función de Transferencia puede verse que el error *rmse* que este presenta es menor al de los modelos de línea uniforme de Papaleonidopoulos y Parámetros T mientras que en el factor de correlación para secciones de longitud pequeña los valores son parecidos en todos los modelos (tabla 4.1). Por lo que a partir de esto puede decirse que el modelo aproximado es un buen método para aplicarlo en líneas en donde se desconoce la geometría.

En lo que respecta a la longitud de las secciones, en esta línea, los resultados más estables en el factor de correlación (comportamientos de la Función de Transferencia más parecidas al real) se obtendrán cuando estas longitudes sean de solo unos pocos centímetros. Para tener resultados más concluyentes y generales sobre la longitud que las secciones deben

tener es necesario hacer más mediciones en otras líneas no uniformes ya que esto podría ser solo un caso particular.

4.7 Consideraciones sobre la permitividad relativa y la tangente de pérdidas.

La permitividad dieléctrica relativa ε_r , y tangente de pérdidas $\tan\delta$, de los materiales aislantes dependen de la temperatura, frecuencia, tensión aplicada y composición química (la cual puede variar mucho según los productos utilizados y fabricante que los elaboró), y los valores otorgados por los fabricantes solo son aproximados y constantes, y hasta ciertos valores de frecuencia [41-43].

En la línea en la que se realizaron las mediciones se consideró como dieléctrico el PVC, (Cloruro de Polivinilo) ya que es el más frecuentemente utilizado en los cables eléctricos; este tiene una permitividad dieléctrica ε_r que va desde 3.3 hasta 4.5 y una tangente de pérdidas de 4×10^{-2} para una frecuencia de 1 MHz [43] (el intervalo de operación de PLC inicia en este punto). Debido a esto es necesario encontrar una relación que nos muestre el comportamiento más preciso en frecuencia que estos parámetros tienen con la finalidad de obtener una mejor aproximación en el modelo.

Para encontrar los valores de la permitividad dieléctrica y de la tangente de pérdidas que tiene la línea en función de la frecuencia se realizaron diversas adecuaciones a estos dos valores en el modelo teórico para observar cuales valores ajustaban, en ciertos puntos; de mejor manera los resultados del modelo con los reales obtenidos en la Función de Transferencia experimental. A partir de estos puntos se hizo uso de un ajuste de curvas mediante mínimos cuadrados [44, 45] para encontrar una función que describa la permitividad y tangente de pérdidas en frecuencia.

Se encontró que la ecuación de la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia que mejor describe el comportamiento real de la Función de Transferencia de la línea es (4.1):

$$\varepsilon_r(f) = -7.1861 \times 10^{-9} f + 2.9714 \quad (4.1)$$

Mientras que para la tangente de pérdidas se tiene (4.2):

$$\tan \delta(f) = -1.0299 \times 10^{-17} f^2 + 3.0498 \times 10^{-10} f + 0.0814 \quad (4.2)$$

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran las gráficas del comportamiento en frecuencia de la permitividad y la tangente de pérdidas respectivamente encontradas para esta línea.

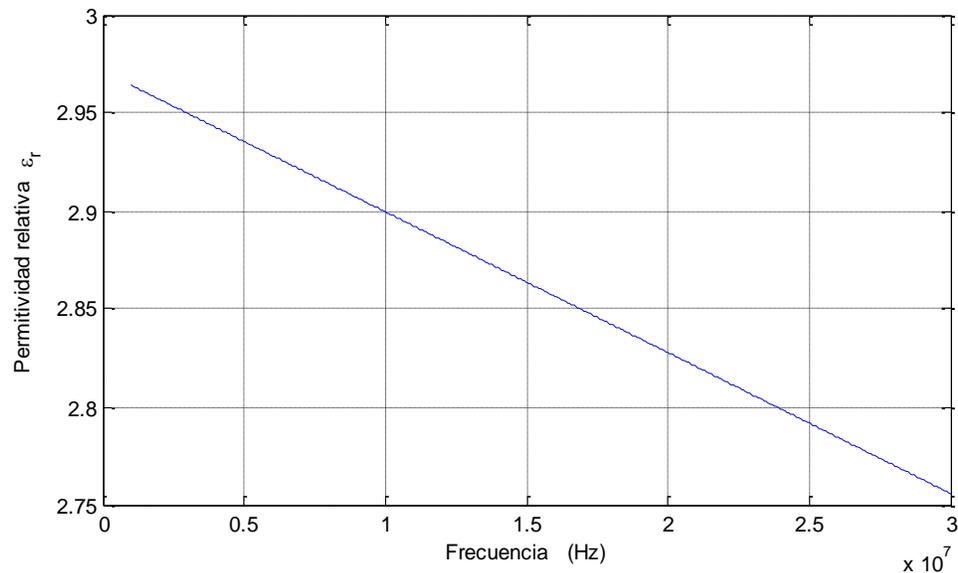


Figura 4.21 Comportamiento en frecuencia de la permitividad relativa ϵ_r del dieléctrico

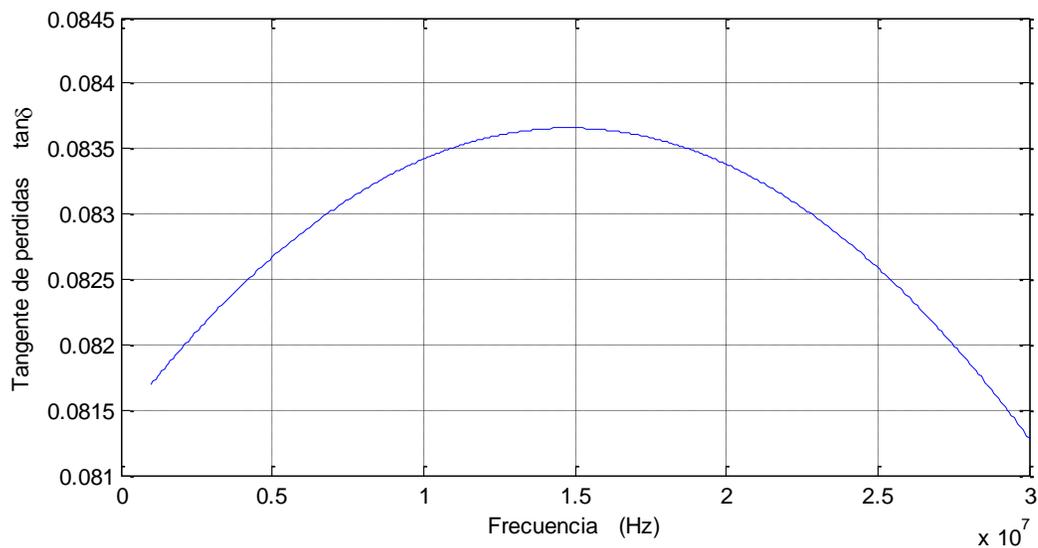


Figura 4.22 Comportamiento en frecuencia de la tangente de pérdidas $\tan \delta$ del dieléctrico

Con la permitividad relativa ϵ_r y la tangente de pérdidas expresadas por (4.1) y (4.2) se calculó la Función de Transferencia para una línea sin bifurcaciones mediante el modelo de Parámetros T y se comparó con la que se obtiene cuando estos valores son considerados constantes, figura 4.23.

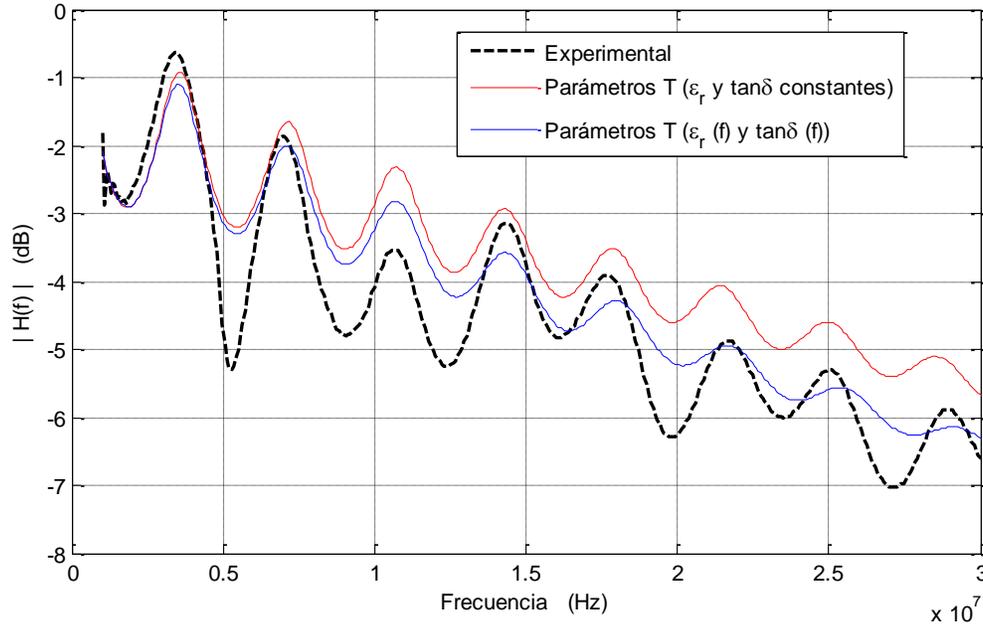


Figura 4.23 Funciones de Transferencia experimental y del modelo de Parámetros T cuando ϵ_r y $\tan\delta$ son constantes y cuando están en función de la frecuencia.

Los valores de factor de correlación r y error $rmse$ que se obtuvieron cuando se consideraron a la permitividad y tangente de pérdidas en función de la frecuencia fueron: $r=0.9325$ y $rmse=0.6270$; el factor de correlación es similar a los obtenidos anteriormente pero el valor $rmse$ es más bajo, tabla 2.2; es decir se obtuvieron mejores resultados, figura 4.23; por lo cual se hace necesario encontrar para los materiales dieléctricos que se usan en los cables eléctricos el comportamiento en frecuencia, ya que debido a que estos no fueron diseñados para usarse en sistemas de comunicaciones los fabricantes de estos no otorgan los valores que estos presentan a altas frecuencias y cuando lo hacen estos valores solo son hasta ciertas frecuencias y de forma puntual, por lo que se deja como un trabajo a futuro el que mediante diversas mediciones de diferentes líneas encontrar una aproximación del comportamiento en frecuencia de la permitividad y tangente de pérdidas del dieléctrico.

CONCLUSIONES

Diseñado originalmente para la distribución de energía eléctrica y no para la transmisión de señales de comunicación, la red de energía eléctrica sufre de un gran número de problemas que otros medios de comunicación no tienen, fibra óptica, par trenzado, etc., como son: la atenuación variante en tiempo y frecuencia del medio, la dependencia del modelo del canal de factores como la topología y las cargas conectadas a ella, entre otros, y ya que el diseño de cualquier sistema de comunicación requiere un completo entendimiento de las características del canal se han tomado en cuenta todos estos factores para desarrollar diversos modelos de análisis del canal por medio de su Función de Transferencia, la cual es modelada como una suma de las réplicas de la señal transmitida inicialmente que difieren en amplitud y fase. Cada replica representa el resultado de la propagación a través de una trayectoria en particular. Además es posible delimitar el efecto de las réplicas en un número finito de trayectorias significantes ya que conforme la longitud de esta aumenta su nivel de atenuación se incrementa, y por lo tanto, su contribución decrece.

La señal recibida en un canal de comunicaciones PLC no siempre se modela como una suma de diversas componentes, esta señal también puede describirse por una multiplicación en cadena, ya sea de Funciones de Transferencia (modelo de H. Philipps), de matrices de dispersión (modelo de H, Meng), o de matrices de Parámetros de Transmisión. Se toma ventaja de una de las propiedades que poseen las matrices de Transmisión que es la de manejar conexiones en cascada por medio de la regla de la cadena para partir de esta y proponer una solución al problema de la no uniformidad en las líneas de energía eléctrica domestica de baja tensión, la cual no se considera en los modelos de análisis encontrados en la literatura. La propuesta de solución se basó en segmentar la línea y a cada una de estas secciones considerarla uniforme para obtener su respectiva matriz de transmisión y después aplicar la regla de la cadena para obtener una matriz total.

Este modelo de análisis fue validado por medio de mediciones en laboratorio al hacer una comparación entre los resultados obtenidos en las Funciones de Transferencia que consideran a la línea como uniforme con las obtenidas cuando esta se considera como no

uniforme, se observa claramente que para obtener resultados más cercanos al comportamiento real de la línea es necesario tener en cuenta la no uniformidad de la línea. También se comprobó teórica y experimentalmente que el canal PLC es simétrico, en el sentido que exhibe el mismo comportamiento si es manejado en una dirección o en otra, lo que en un canal de comunicación se puede traducir como un factor de estabilidad, lo cual es deseable.

Se realizó una comparación entre los diversos modelos de análisis presentados en este trabajo mediante un factor de correlación r , el cual describe el grado de relación que existe entre funciones, y un valor $rmse$, que son una forma de medir las diferencias entre los valores reales y los del modelo. A partir de estos factores se observó de manera cuantitativa que todos los modelos presentados describen de muy buena forma un canal PLC uniforme pero al aplicarlos a líneas no uniformes el desempeño de estos es menor al modelo propuesto ya que este describe de mejor manera el comportamiento real del canal PLC no uniforme.

Uno de los principales efectos que tiene la no uniformidad de la línea sobre la Función de Transferencia es la atenuación que esta presenta con respecto a una línea uniforme.

Se tuvo un control sobre la geometría de la línea en la que se hicieron las mediciones de la Función de Transferencia lo cual generó que los resultados obtenidos fueran muy buenos, pero para el caso en que se desconoce la geometría de esta (las líneas domésticas generalmente están en la paredes de la casa dentro de tubos, lo cual no permite conocer la geometría de esta) se presenta el método visto en la sección 3.5 y que se describe más claramente mediante un diagrama de flujo en el apéndice D.8. Este método presentará resultados diferentes entre sí y solamente aproximados al valor real de la Función de Transferencia de la línea debido a que las separaciones entre conductores dadas no serán iguales a las reales además de que cada vez que se realice el procedimiento estas distancias serán diferentes. Pero aun a pesar de estos los resultados de este procedimiento son aceptables, como se demostró en 4.6.

TRABAJO A FUTURO

Volver a realizar una comparación entre los modelos presentados y estudiar su comportamiento al cambiar la topología de la red e incrementar el número de bifurcaciones con el fin de encontrar cual es el modelo óptimo para la descripción de los canales de comunicación PLC. Este es un punto muy importante de investigación ya que actualmente no existe un modelo de análisis universalmente reconocido, los resultados obtenidos y su interpretación pueden no ser consistentes y algunas veces contradictorios.

Encontrar mediante mediciones en otras topologías si la atenuación de una línea no uniforme con respecto a una uniforme se incrementa con el número de bifurcaciones.

Además de los problemas de topología de la red y de atenuación variante en tiempo y frecuencia debida a las cargas conectadas a esta, se deben de estudiar otros factores que afectan el desempeño de la red eléctrica como canal de comunicación, tales como son: los diversos tipos de interferencias debidas al ruido inherente del canal, interferencia debida al ruido en las cargas, ruido impulsivo debido al encendido y apagado de las cargas, entre otros.

Los valores de Permitividad dieléctrica relativa ϵ_r , y tangente de pérdidas $\tan\delta$ dados por los fabricantes de materiales aislantes sólo son aproximados y constantes, y ya que estos dependen de la temperatura, frecuencia, tensión aplicada y composición química (la cual puede variar mucho según los productos utilizados y fabricante que los elaboró), es necesario encontrar una relación que nos muestre el comportamiento más preciso en frecuencia que estos tienen. Esto con la finalidad de obtener una mejor aproximación en el modelo.

APÉNDICE A

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR

El circuito de interface, o acoplador, con la línea eléctrica es uno de los más críticos componentes de cualquier sistema PLC. Debido a los altos voltajes, su impedancia aleatoria en el tiempo, los picos transitorios de la línea; generalmente ocasionados en el encendido y apagado de los equipos, los circuitos de acoplamiento necesitan ser cuidadosamente diseñados para transmitir o recibir la señal de alta frecuencia PLC y lograr la atenuación suficiente de la señal eléctrica para no dañar al equipo transmisor / receptor, o en este caso al equipo de medición.

A.1 Caracterización del acoplador diseñado

El proceso de filtrar (discriminar entre diferentes frecuencias) forma la base de los circuitos de acoplamiento los cuales serán utilizados para alimentar o extraer la señal de comunicación a la red eléctrica [30-34] Se propone un filtro, figura A.1, el cual será capaz de lograr una atenuación de la señal de 60 Hz en un rango entre -100 dB y -160 dB, lo que equivale que a la salida de este se tenga una señal entre 1.20 mV y 1.20 μ V. Estos valores son lo suficientemente bajos para que el analizador de redes HP4195A no se vea afectado por estos, es decir, no dañaran al equipo, principal función de este dispositivo.

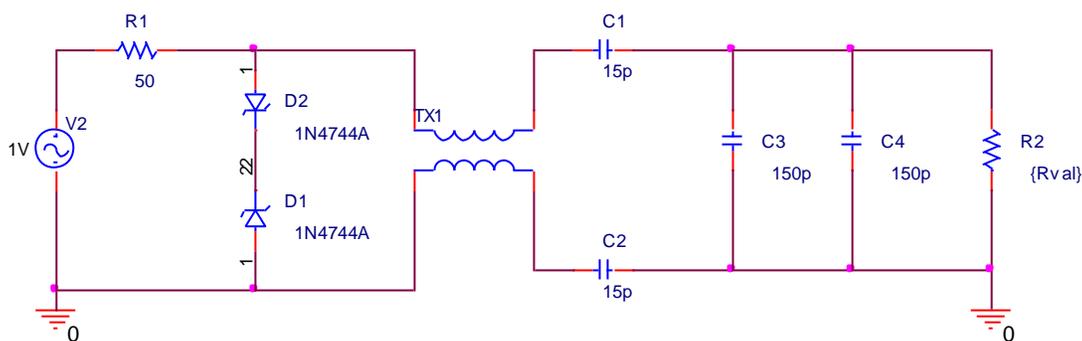


Figura A.1 Circuito Acoplador propuesto

De la figura A.5, el resistor R1 equivale a la resistencia de entrada del equipo de medición, la función de los diodos D1 y D2 es proteger al equipo de posibles picos de

voltaje transitorios que pudieran llegar a darse y dañasen al equipo, los capacitores y el transformador TX1 son el circuito filtro, y el resistor R2 representa los posibles valores de impedancia que pudiese llegar a tener la línea eléctrica. La impedancia de la línea variará según la longitud de esta y las cargas que se le conecten a la red, ver (1.35), para la red sin cargas en la que se realizaron las pruebas el valor de la impedancia de entrada, R2 en el circuito propuesto, será el que se muestra en la figura A.2.

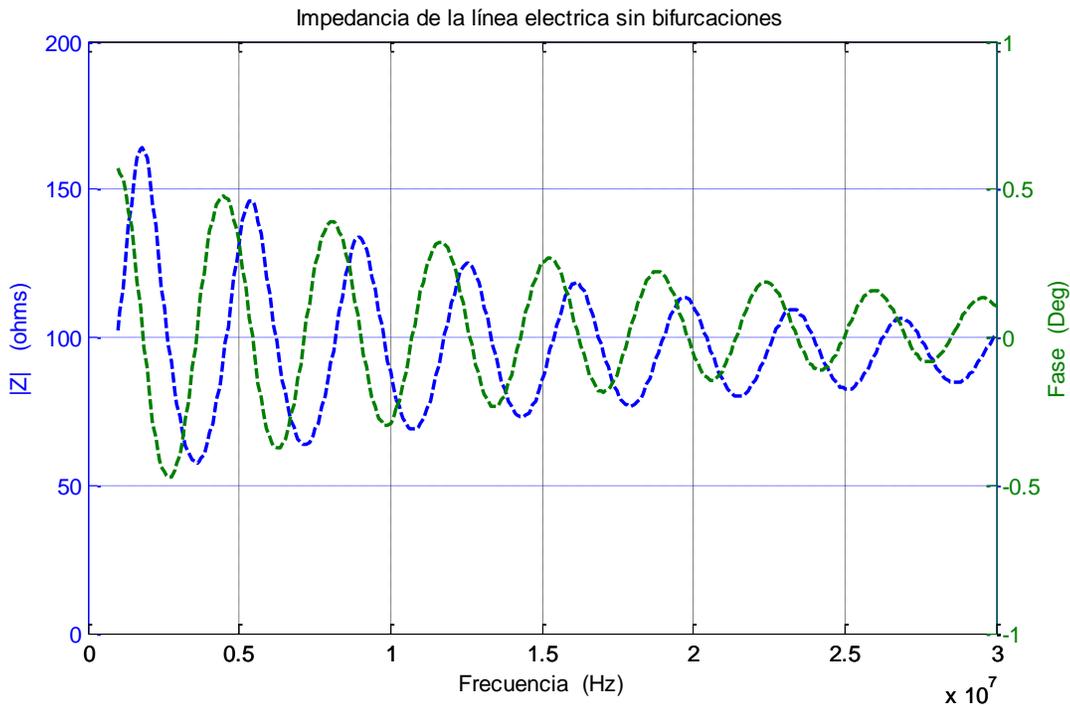


Figura A.2 Impedancia de entrada de la línea sin bifurcaciones

Cuando a la red se le conecten todas las cargas la impedancia de entrada que está presente cambiará y esta presentara el comportamiento de la figura A.3, esto es para las cargas que se usaron en las pruebas, con otras cargas esta impedancia tendrá un comportamiento distinto. A partir de estos valores y los dados en [31] es que se propone para el análisis en ORCAD [46] que el valor de R2, {Rval} será entre 1Ω y $1 K\Omega$.

Se realizará un barrido en frecuencia con diferentes valores de R2 los cuales serán 1Ω , 10Ω , 25Ω , 75Ω , 100Ω , 200Ω , 500Ω , $1K\Omega$, estos simularan las variaciones en la

impedancia de entrada de la línea vista por el circuito acoplador, los resultados se presentan en la figura A.4.

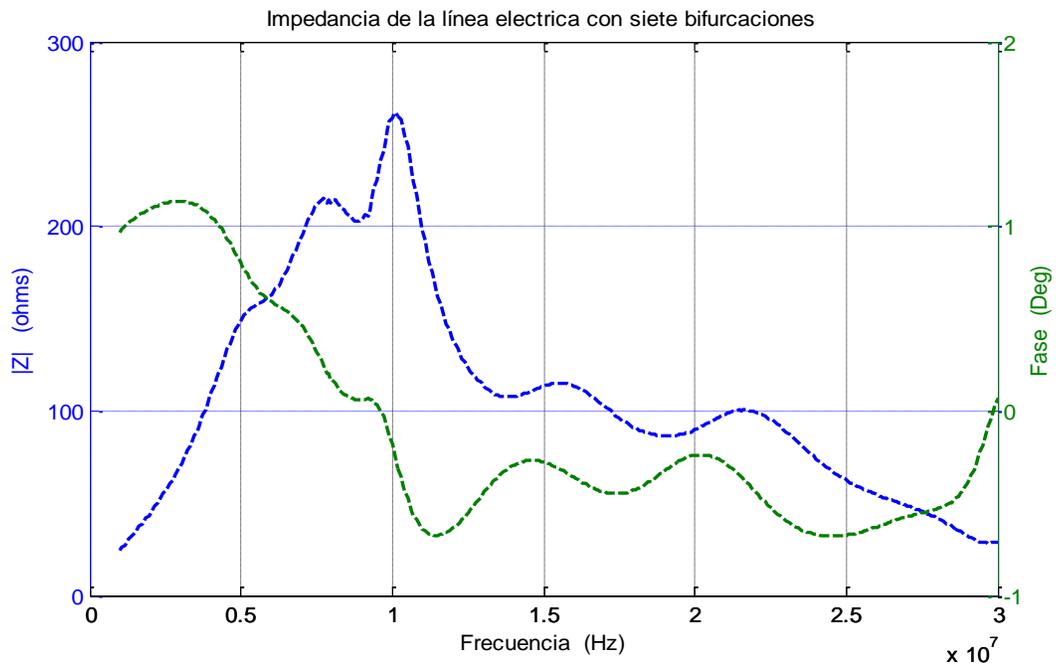


Figura A.3 Impedancia de entrada con siete bifurcaciones

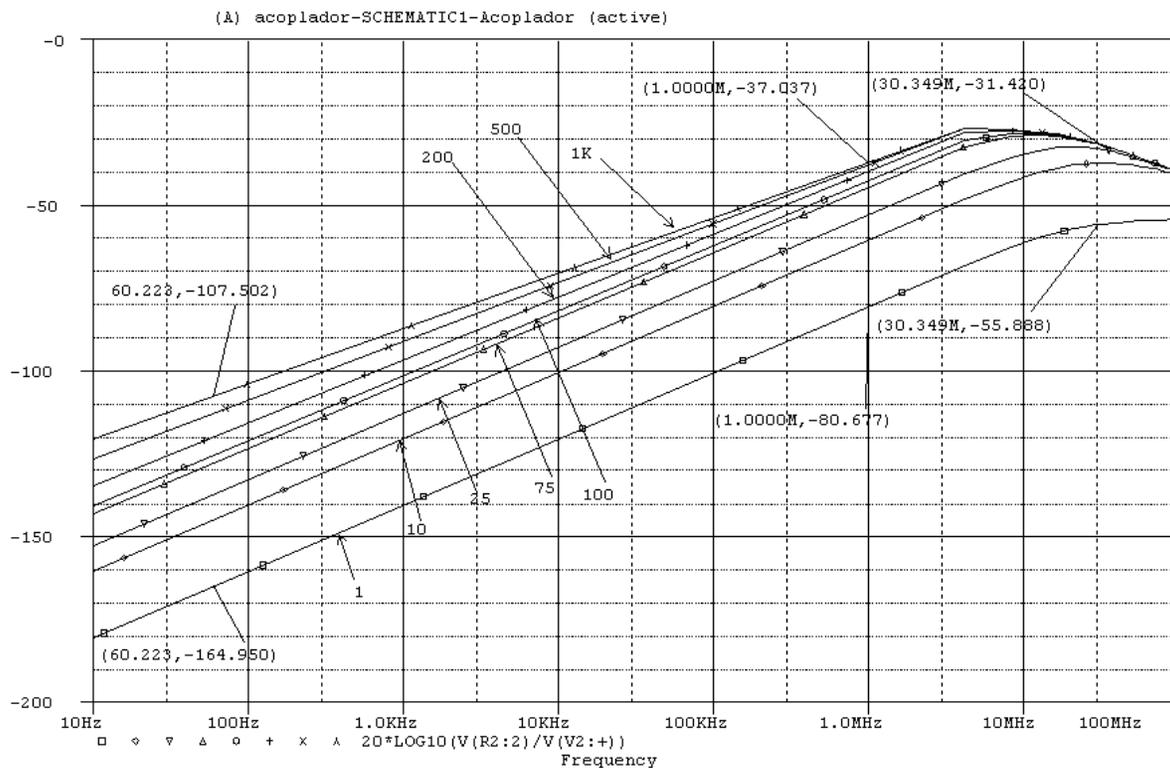


Figura A.4 Respuesta del circuito acoplador con diversos valores de R2 {Rval}

De la figura A.4 se observa que los niveles de atenuación para la frecuencia de 60 Hz se encuentran entre -164.905 dB y -107.502 dB, es decir:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right)$$
$$V_o = V_i \cdot 10^{dB/20}$$

cuando tenemos una atenuación de -164.905 dB tendremos:

$$V_o = 120V \cdot 10^{-164.905dB/20} = 0.682\mu V$$

y para una atenuación de -107.502 dB tenemos:

$$V_o = 120V \cdot 10^{-107.502/20} = 0.505mV$$

Los cuales son valores muy bajos de voltaje y por lo tanto no podrán dañar el equipo de medición, es decir el acoplador cumple su principal función.

Para el intervalo de frecuencias en el que se trabaja se tienen entre -37.037 dB y -80.677 dB de atenuación respectivamente para 1 MHz y entre -55.888 dB y -31.420 dB para 30 MHz. En la Figura A.5 se muestra una fotografía del acoplador que se diseñó y fue utilizado para las mediciones de la función de transferencia del canal PLC, mientras que en la figura A.6 se muestra la respuesta en frecuencia de este, se observa que existe un comportamiento similar al obtenido en la simulación en ORCAD, existe una muesca en los 10 MHz debido a los efectos parásitos de los elementos [47] y a la construcción de la bobina, la cual fue hecha manualmente, sin embargo, esto no afecta la función principal del acoplador que es el rechazar los 60 Hz de la línea eléctrica. Además al realizar las mediciones el acoplador formará parte de la conexión TRUE del analizador HP4195A y este se encargara de compensar estos niveles de atenuación.

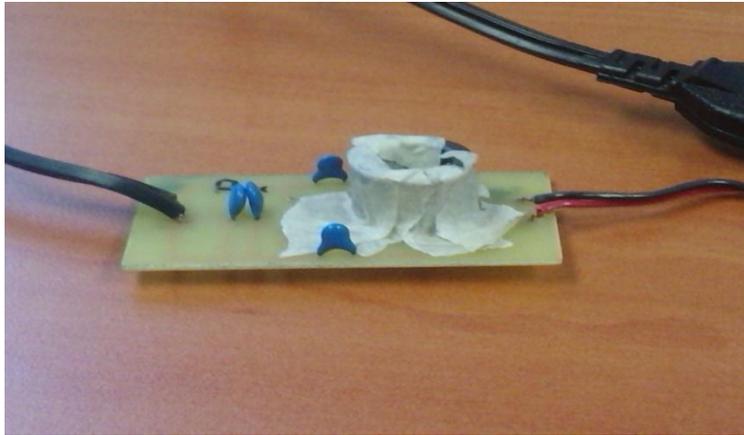


Figura A.5 Acoplador

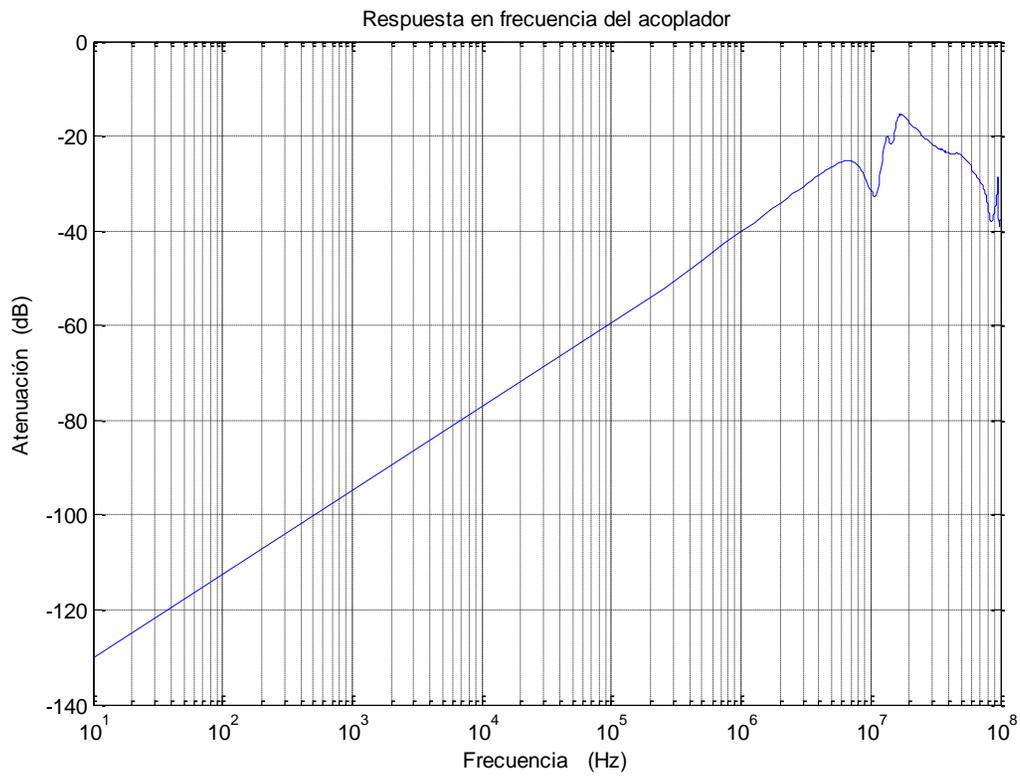


Figura A.6 Respuesta en frecuencia del acoplador

APÉNDICE B

GRAFICAS DE IMPEDANCIA DE ALGUNOS ELECTRODOMESTICOS

El modelo de Parámetros de Transmisión requiere que cada bifurcación sea reemplazada por una impedancia equivalente vista desde los puntos de inicio de la bifurcación, figura 3.3, el cálculo de esta se lleva a cabo mediante las expresiones (1.34) o (1.35); dependiendo de los variables que se conozcan, lo que en otras palabras significa que se debe de calcular la impedancia de entrada vista desde él toma corriente del electrodoméstico.

Para evitar el cálculo de la impedancia de entrada del electrodoméstico se hace uso del Analizador de Redes HP4195A en su modo de analizador de impedancia, el cual dará el comportamiento en frecuencia de la impedancia del electrodoméstico, figura B1.

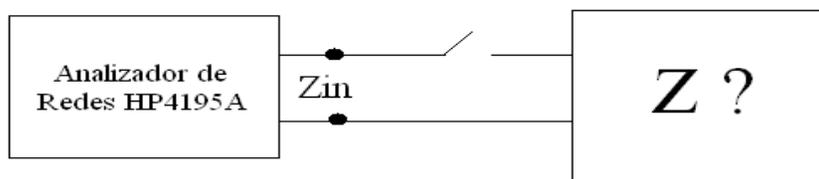


Figura B.1 Caracterización de la impedancia de los electrodomésticos

En las figuras siguientes se muestra el comportamiento en frecuencia de las impedancias de los electrodomésticos utilizados como bifurcaciones en las pruebas de validación del modelo hechas en el laboratorio.

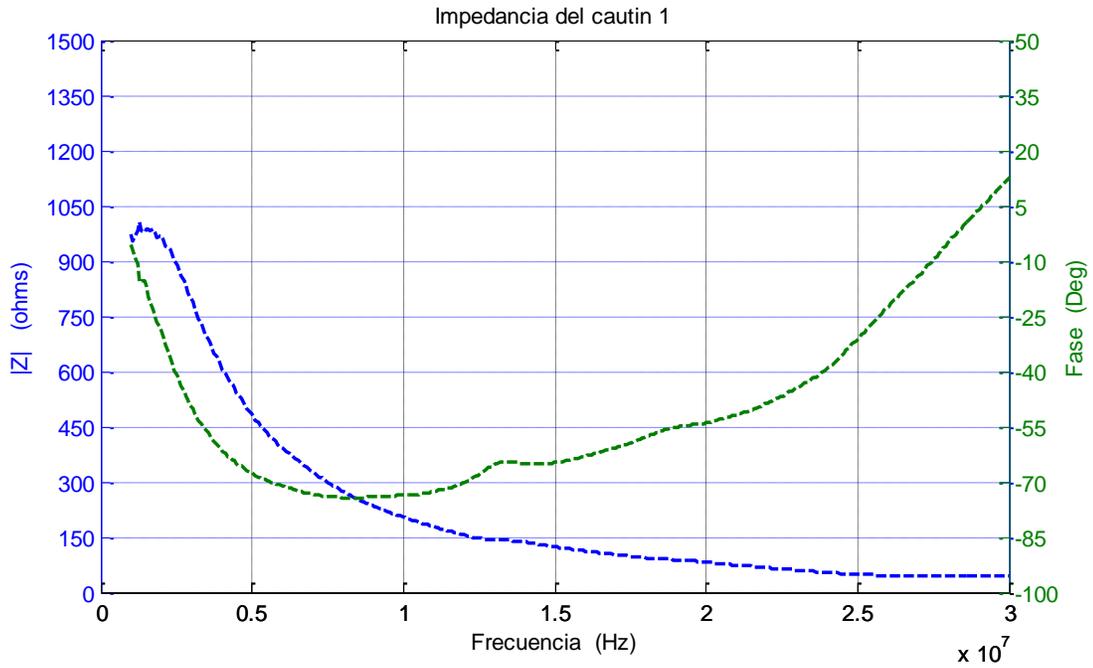


Figura B.2 Comportamiento en frecuencia de la impedancia del cautin 1

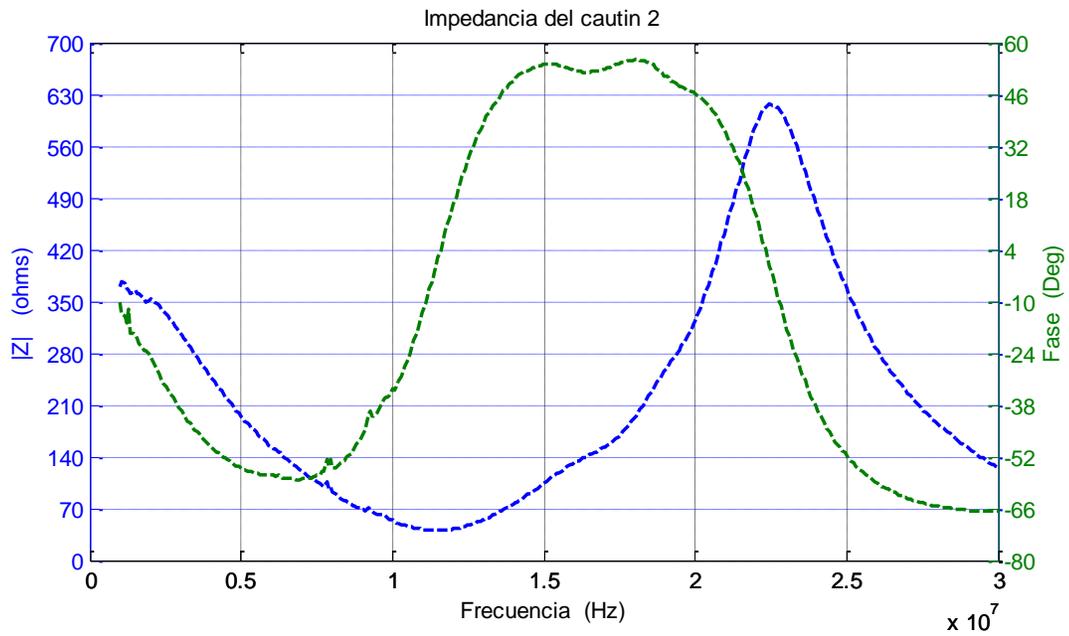


Figura B.3 Comportamiento en frecuencia de la impedancia del cautin 2

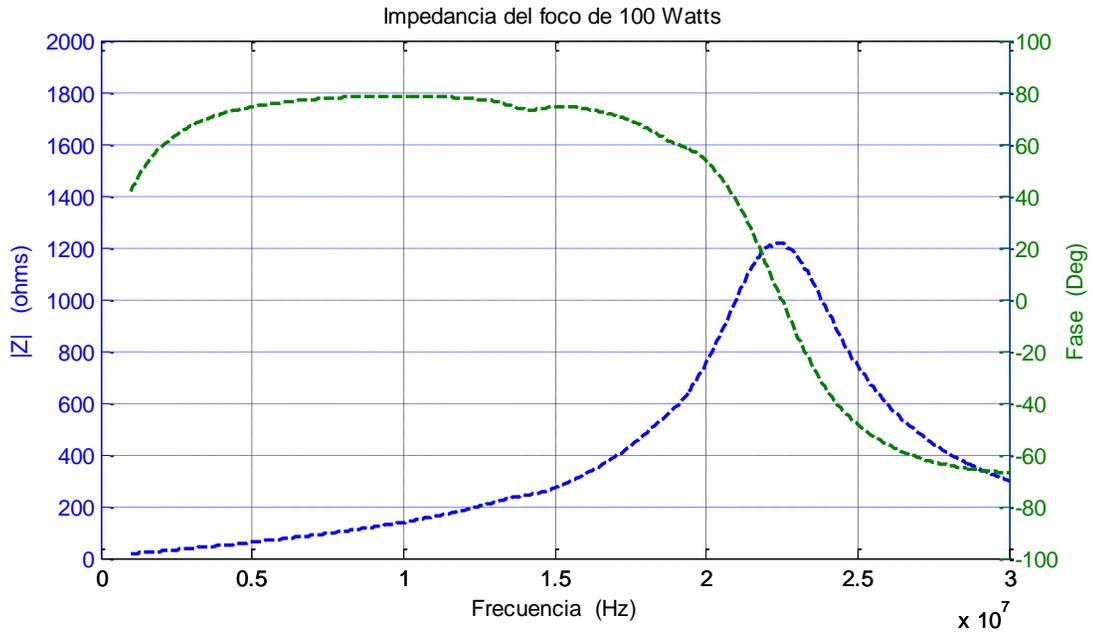


Figura B.4 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de un foco de 100W

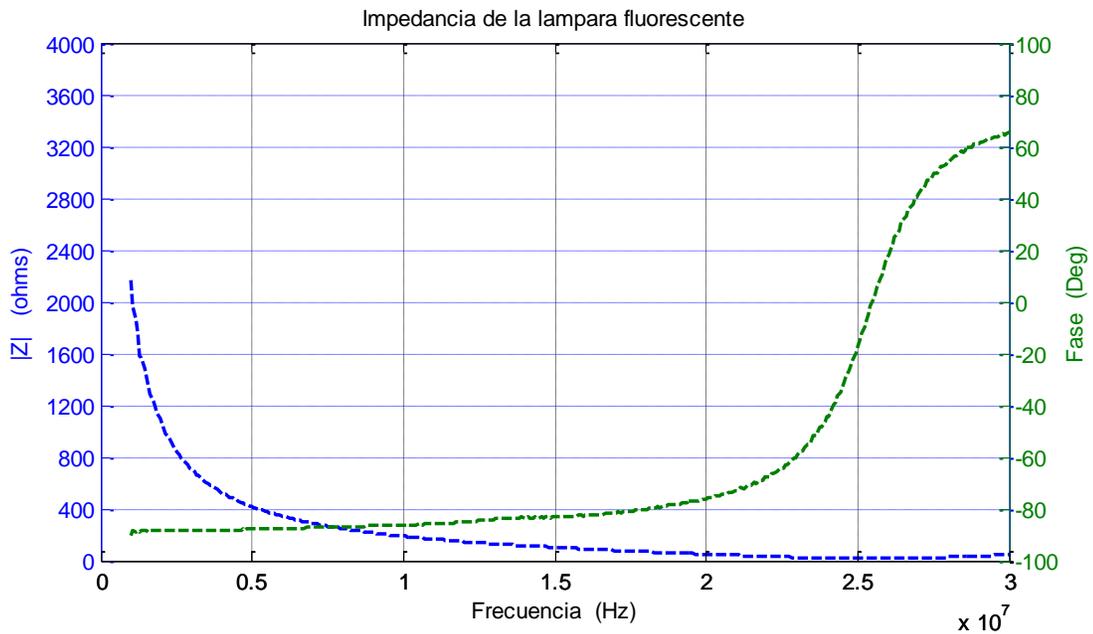


Figura B.5 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la lámpara fluorescente

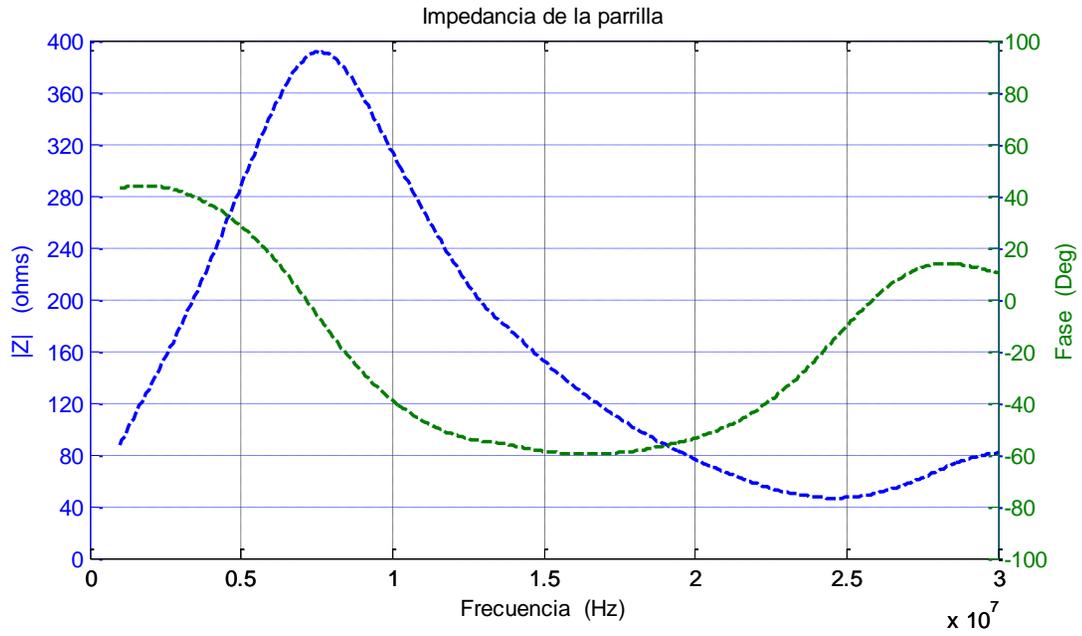


Figura B.6 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la parrilla

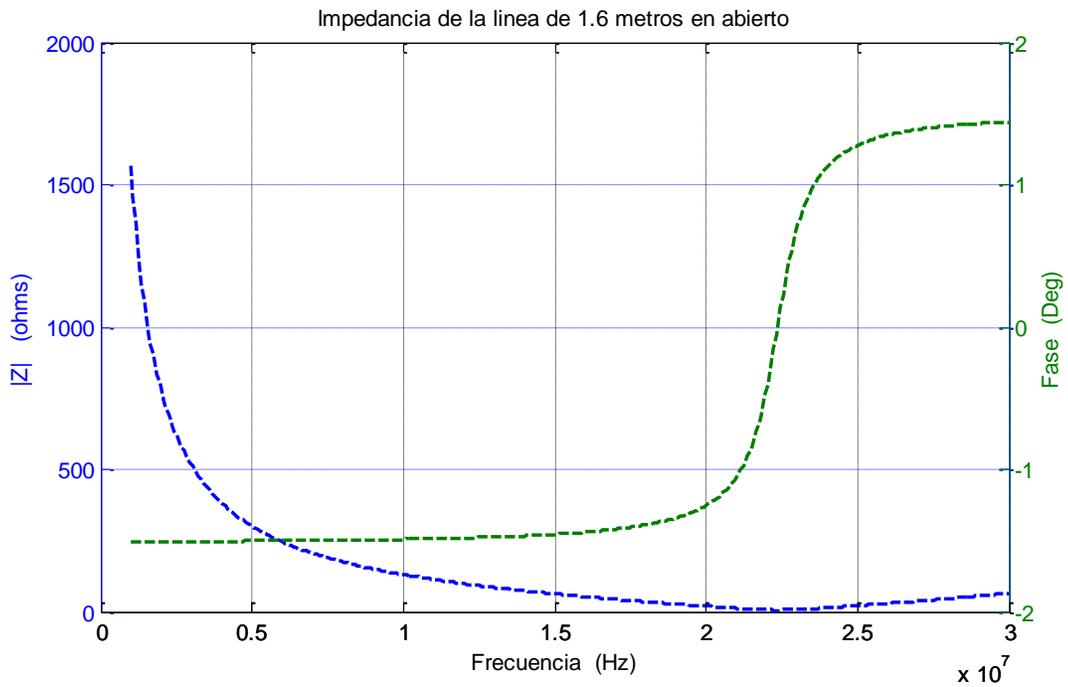


Figura B.7 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la línea de 1.6 m en abierto

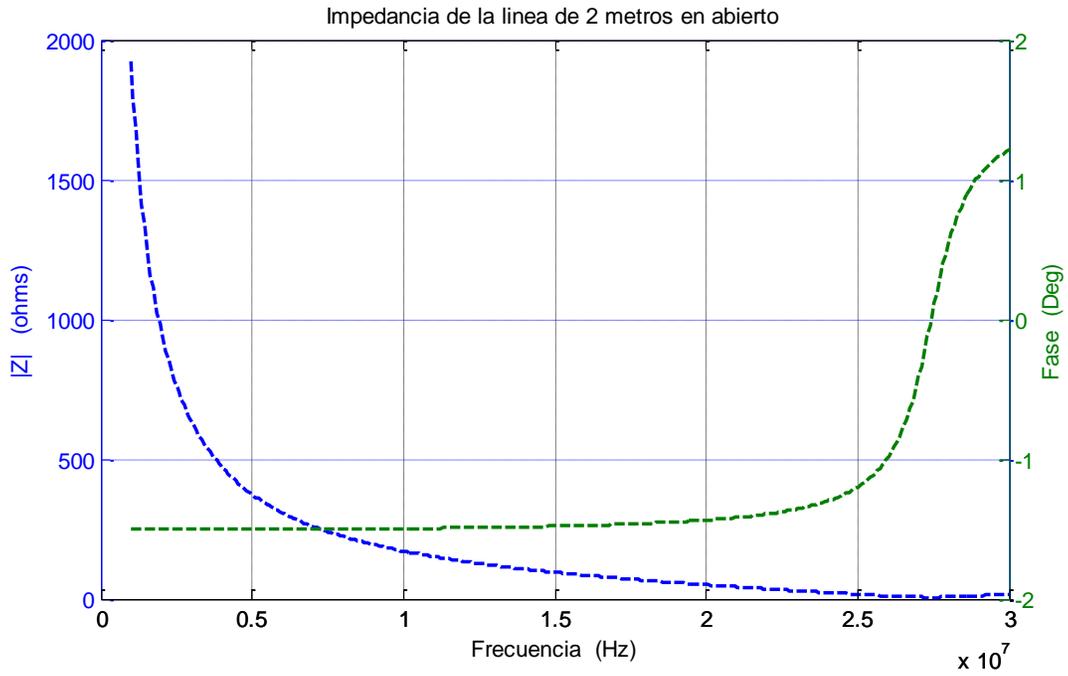


Figura B.8 Comportamiento en frecuencia de la impedancia de la línea de 2 metros en abierto

APÉNDICE C

CONCEPTOS ESTADÍSTICOS UTILIZADOS

En esta sección se da una descripción de algunos conceptos estadísticos utilizados durante el presente trabajo, esto con el fin de hacer más comprensible la interpretación de los resultados presentados.

C.1 Teoría de la Correlación

En la correlación o grado de relación entre las variables se busca determinar que tan bien una ecuación lineal, o de otro tipo, describe o explica la relación entre las variables [45, 48, 49]. Si todos los valores de las variables satisfacen con exactitud una ecuación, se dice que las variables están en perfecta correlación o que hay una correlación perfecta entre ellas. Así, las circunferencias C y los radios r de todos los círculos están perfectamente correlacionados, ya que $C = 2\pi r$. Cuando se lanzan 100 veces dos dados en forma simultánea entre los puntos que aparecen en cada uno de ellos no hay relación alguna (a menos que estén cargados); es decir no están correlacionados. Sin embargo, variables como el peso y la estatura de una persona muestran cierta correlación.

Cuando intervienen sólo dos variables se habla de correlación simple y de regresión simple. Cuando intervienen más de dos variables, se habla de correlación múltiple y de regresión múltiple.

Correlación lineal

Si X y Y son las variables en consideración, un diagrama de dispersión sirve para mostrar la localización de los puntos (X, Y) en un sistema de coordenadas rectangulares. Si en este diagrama de dispersión todos los puntos parecen encontrarse cerca de una línea recta, a la correlación se le llama lineal. En estos casos, una ecuación lineal es lo más apropiado con el propósito de regresión. Si todos los puntos parecen encontrarse en una curva, esta

correspondencia se llama no lineal, y lo apropiado para la regresión es una ecuación no lineal. Si no parece haber relación entre las variables, se dice que no hay relación entre ellas, es decir, están descorrelacionadas.

El estándar de estimación

Si Y_{est} es el valor estimado de Y para un valor dado de X , una medida de la dispersión respecto a la recta de regresión de Y sobre X es la cantidad [45]:

$$S_{Y.X} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{est})^2}{N}} \quad (C.1)$$

a la que se le llama error estándar de estimación de Y sobre X . El error estándar de estimación análogo, de X sobre Y , es:

$$S_{X.Y} = \sqrt{\frac{\sum (X - X_{est})^2}{N}} \quad (C.2)$$

En general $S_{Y.X} \neq S_{X.Y}$. La ecuación (C.1) también puede expresarse en la forma:

$$S_{Y.X}^2 = \frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY}{N} \quad (C.3)$$

Para la ecuación (C.2) existe una expresión similar.

El error estándar de estimación tiene propiedades análogas a la desviación estándar. Por ejemplo, si se trazan rectas paralelas a la recta de regresión de Y sobre X a las distancias verticales $S_{Y.X}$, $2S_{Y.X}$ y $3S_{Y.X}$, se hallara, si N es suficientemente grande, que entre estas rectas se encuentra 68%, 95% y 97.7% de los puntos muestrales, respectivamente.

Variación explicada y no explicada

La variación total de Y se define como $\sum(Y - \bar{Y})^2$; es decir, la suma de los cuadrados de las desviaciones de Y respecto a la media \bar{Y} . Esta expresión se puede expresar como:

$$\sum(Y - \bar{Y})^2 = \sum(Y - Y_{est})^2 + \sum(Y_{est} - \bar{Y})^2 \quad (C.4)$$

En la ecuación (C.9), al primer término del lado derecho se le llama variación no explicada, en tanto que al segundo término se le llama variación explicada; se les llama así debido a que las desviaciones $Y_{est} - \bar{Y}$ tienen un patrón definido; en cambio, las desviaciones $Y - Y_{est}$ son aleatorias o impredecibles. Para la variable X existe una fórmula similar.

Coefficiente de correlación

Al cociente de la variación explicada entre la variación total se le llama coeficiente de determinación. Si hay cero variación explicada (es decir, si la variación total es sólo variación no explicada), este cociente es 0. Si hay 0 variación no explicada (es decir, si la variación total es sólo variación explicada), este cociente es 1. En los demás casos, este cociente se encuentra entre 0 y 1; como siempre es no negativo, se denota r^2 . A la cantidad r se le llama coeficiente de correlación; está dado por [45]:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum(Y_{est} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (C.5)$$

y varía entre -1 y +1. Los signos + y - se usan para correlación lineal positiva y correlación lineal negativa. Respectivamente. Obsérvese que r es una cantidad adimensional; es decir, no depende de las unidades que se empleen. Utilizando las ecuaciones (C.1) y (C.4) y el hecho de que la desviación estándar de Y es:

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{N}} \quad (C.6)$$

se encuentra que la ecuación (C.5) puede expresarse, sin hacer caso del signo, como:

$$r = \sqrt{1 - \frac{S_{Y.X}^2}{S_Y^2}} \quad \text{o bien} \quad S_{Y.X} = S_Y \sqrt{1 - r^2} \quad (C.7)$$

Si se intercambian X y Y se obtienen ecuaciones similares. En el caso de la correlación lineal, la cantidad r es la misma, ya sea que se considere a X o a Y como la variable independiente. Por lo tanto r es una muy buena medida de la correlación lineal entre dos variables.

Observaciones acerca del coeficiente de correlación

Las definiciones del coeficiente de correlación dadas en las ecuaciones (C.5) y (C.7) son muy generales y pueden emplearse tanto para relaciones no lineales como para relaciones lineales; la única diferencia es que Y_{est} se calcula a partir de una ecuación de regresión no lineal y no a partir de una ecuación de regresión lineal, y que los signos $+$ y $-$ se omiten. En estos casos la ecuación (C.1), que define el error estándar de estimación, es perfectamente general. Sin embargo, la ecuación (C.3) que se emplea únicamente para regresión lineal, debe ser modificada.

Hay que subrayar que en todos los casos, el valor calculado para r mide el grado de relación respecto al tipo de ecuación que se emplee. Así, si se utiliza una ecuación lineal y con la (C.5) y (C.7) dan un valor de r cercano a cero, esto significa que entre las variables casi no hay correlación lineal. Pero esto no significa que no haya correlación alguna, pues entre estas variables puede haber una fuerte correlación no lineal. En otras palabras, el coeficiente de correlación mide la bondad de ajuste entre: 1) la ecuación empleada y 2) los datos.

C.2 Error cuadrático medio RMSE (Root Mean Square Error)

En la ciencia y en la ingeniería se da, a menudo, el caso de que un experimento produce un conjunto de datos $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$, siendo las abscisas $\{x_k\}$ distintas entre sí. Uno de los objetivos del cálculo numérico es la determinación de una fórmula $y = f(x)$ que relacione las variables. Normalmente se dispone de una clase de fórmulas previamente establecidas, y lo que hay que hallar son los valores más adecuados de unos coeficientes o de unos parámetros para estas fórmulas. Aunque hay muchos tipos distintos de funciones que se pueden usar, suele ocurrir que existe un modelo matemático subyacente, basado en la situación física que se esté estudiando, que determina la forma de la función salvo algunos coeficientes. Esta clase de funciones pueden llegar a ser lineales de la forma:

$$y = f(x) = Ax + B \quad (\text{C.8})$$

Si todos los valores de $\{x_k\}$, $\{y_k\}$ se conocen con una precisión de varias cifras significativas, la interpolación polinomial produce buenos resultados; lo que no ocurre en otras circunstancias. Algunos experimentos se llevan a cabo usando equipo que puede otorgar los datos solo con cierta precisión y además se le añade un cierto error experimental que sucede que el valor exacto de $f(x_k)$ verifica

$$f(x_k) = y_k + e_k \quad (\text{C.9})$$

donde e_k es el error de medición.

¿Cómo encontrar la mejor aproximación lineal de la forma dada en (C.8) que pase cerca de los puntos? Para responder esta pregunta hay que considerar los errores (también llamados desviaciones o residuos):

$$e_k = f(x_k) - y_k \quad \text{para } 1 \leq k \leq N \quad (\text{C.10})$$

Hay varias normas que se pueden usar con los residuos dados en (C.10) para medir la distancia entre la curva $y = f(x)$ y los datos [50]:

Error máximo:
$$E_{\infty} = \max\{|f(x_k) - y_k| : 1 \leq k \leq N\} \quad (\text{C.11})$$

Error medio:
$$E_1(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k| \quad (\text{C.12})$$

Error cuadrático medio:
$$E_2(f) = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k|^2 \right)^{1/2} \quad (\text{C.13})$$

El error máximo es el más grande; de manera que si el error en un punto es grande, entonces el valor de este error es el que determina $E_{\infty}(f)$. El error medio $E_1(f)$ es simplemente la media aritmética de los valores absolutos de los errores en los puntos; suele usarse a menudo porque es fácil de calcular. El error cuadrático medio *rmse*, es una medida frecuentemente usada de las diferencias entre los valores predichos por un modelo o un estimador y los valores reales observados del objeto a ser modelado o estimado. El *rmse* es una buena medida de la precisión [50, 51].

APÉNDICE D

PROGRAMAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE MATLAB

En esta sección se da la descripción mediante diagramas de flujo de los programas que se realizaron en Matlab [51, 52] para la obtención de las funciones de transferencia de los diversos modelos analizados. Para todos los programas los datos básicos necesarios serán el calibre de los conductores, la separación entre ellos, el dieléctrico, geometría de la línea y parámetros de sus materiales, para que a partir de estos datos se realice el cálculo de sus parámetros básicos, R , L , C y G , con los cuales se obtendrán la constante de propagación e impedancia característica de la línea

D.1 Modelo de I. C. Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos

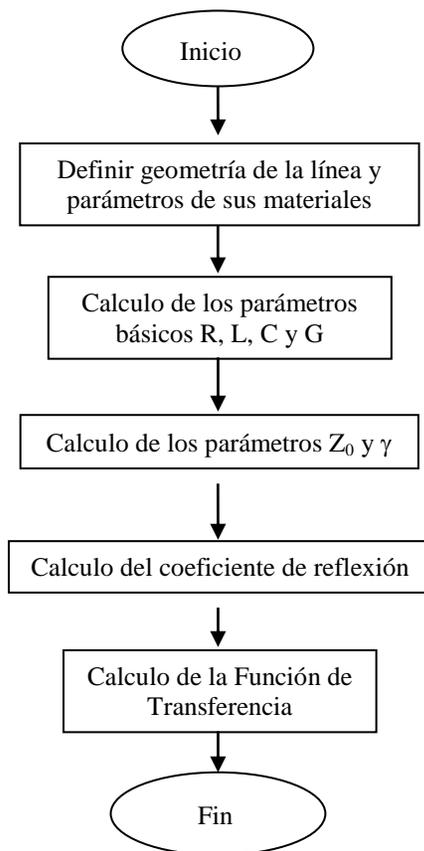


Figura D.1 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de I. C. Papaleonidopoulos y C. G. Karagiannopoulos

D.2 Modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster

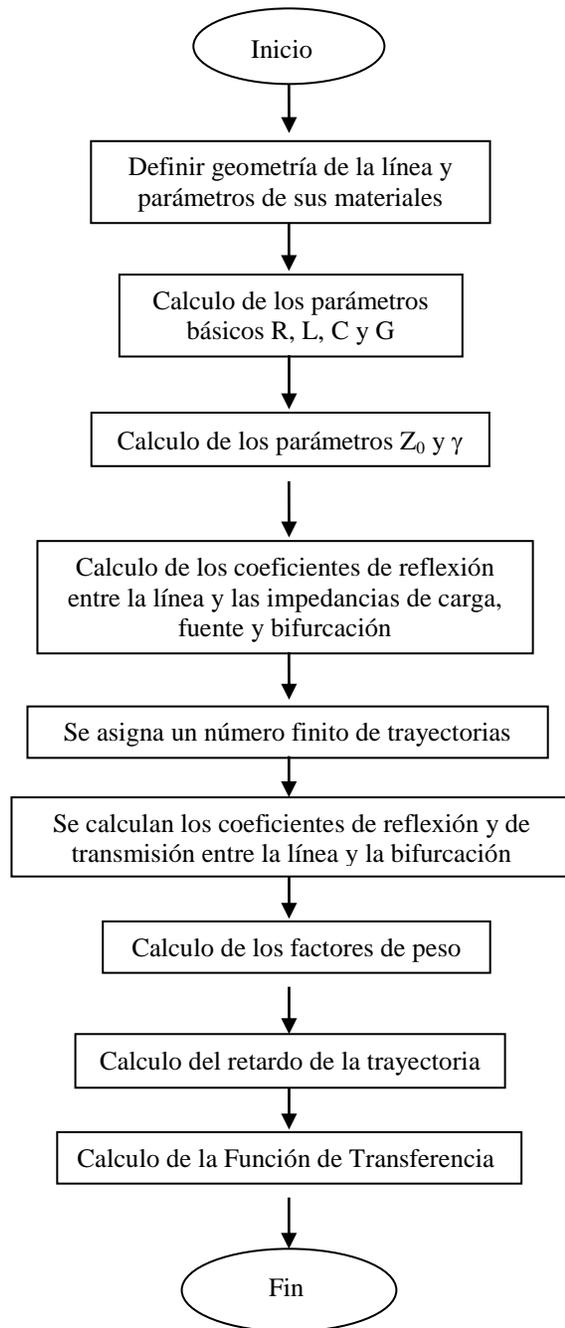


Figura D.2 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster

D.3 Modelo de Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos

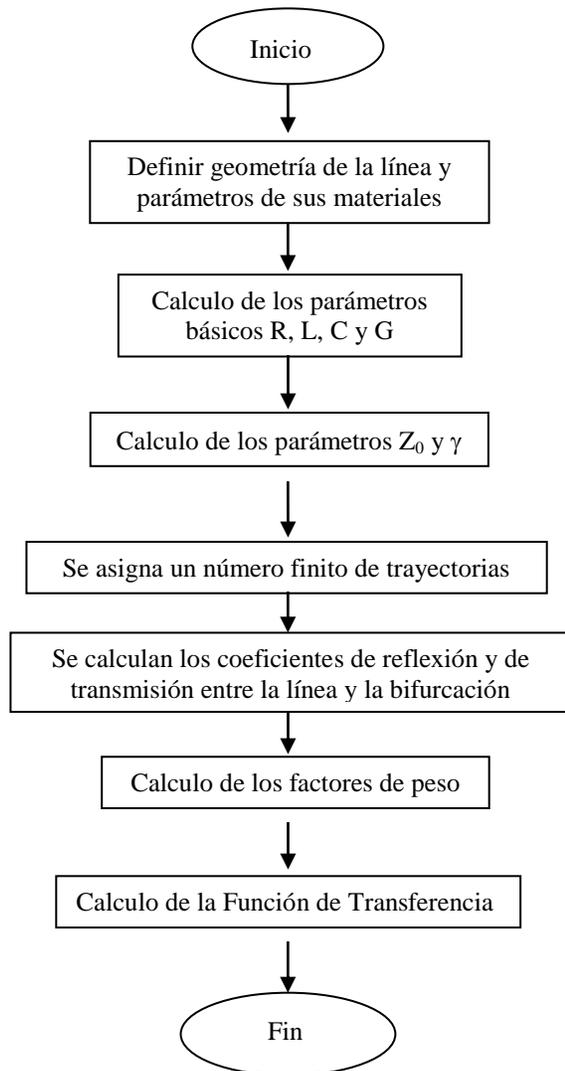


Figura D.3 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos

D.4 Modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan y T. T. Lie

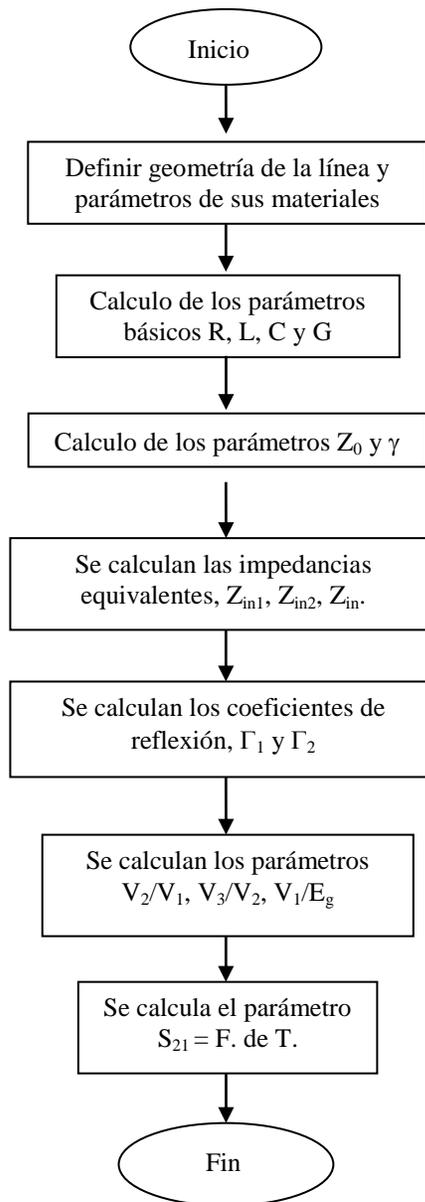


Figura D.4 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan y T. T. Lie

D.5 Modelo de Holger Philipps (Modelo Eco)

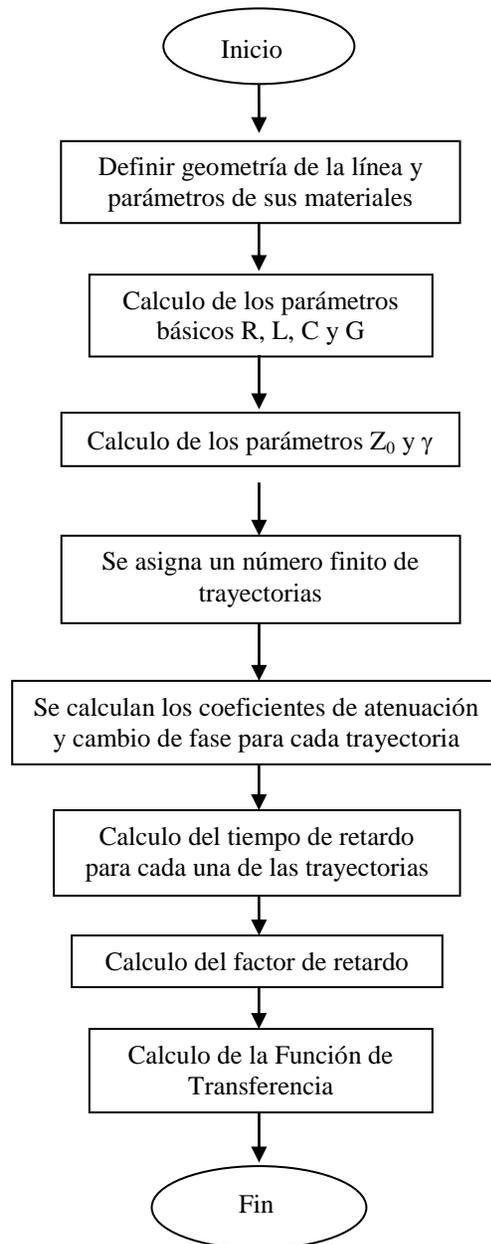


Figura D.5 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Holger Philipps (Modelo Eco)

D.6 Modelo de Holger Philipps (Modelo Circuito Resonante Serie, SRC)

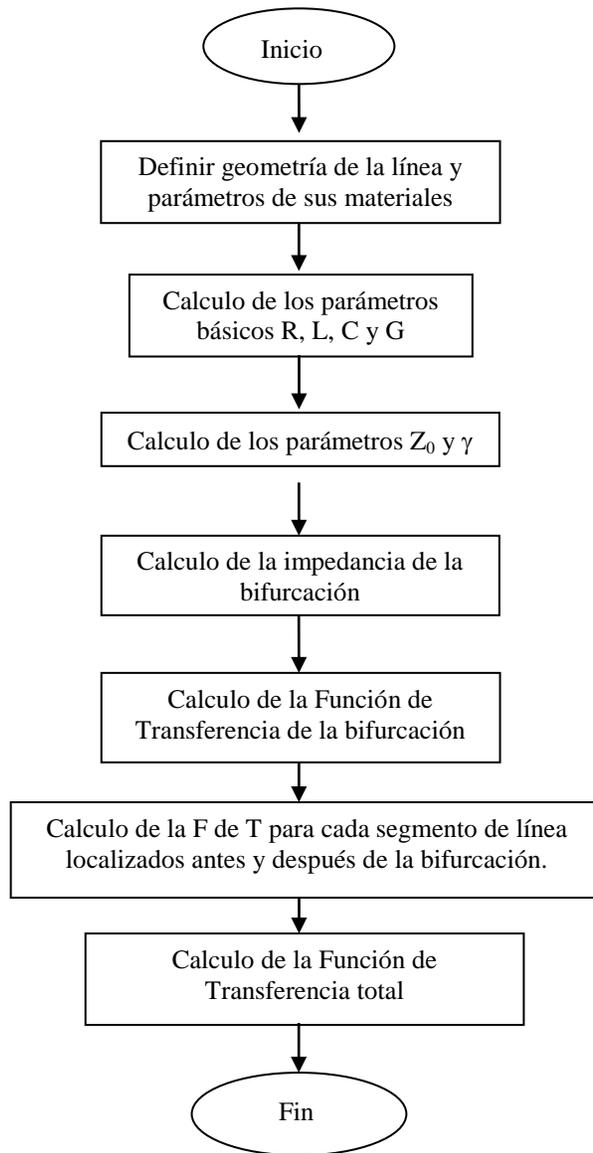


Figura D.6 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Holger Philipps (Modelo Circuito Resonante Serie)

D.7 Modelo de Parámetros de Transmisión

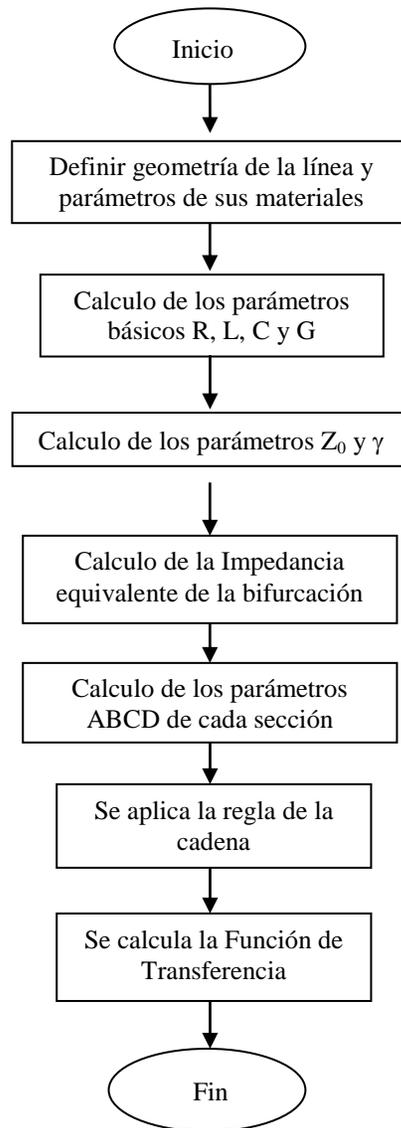


Figura D.7 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Parámetros de Transmisión

D.8 Modelo de Parámetros de Transmisión propuesto para líneas no uniformes

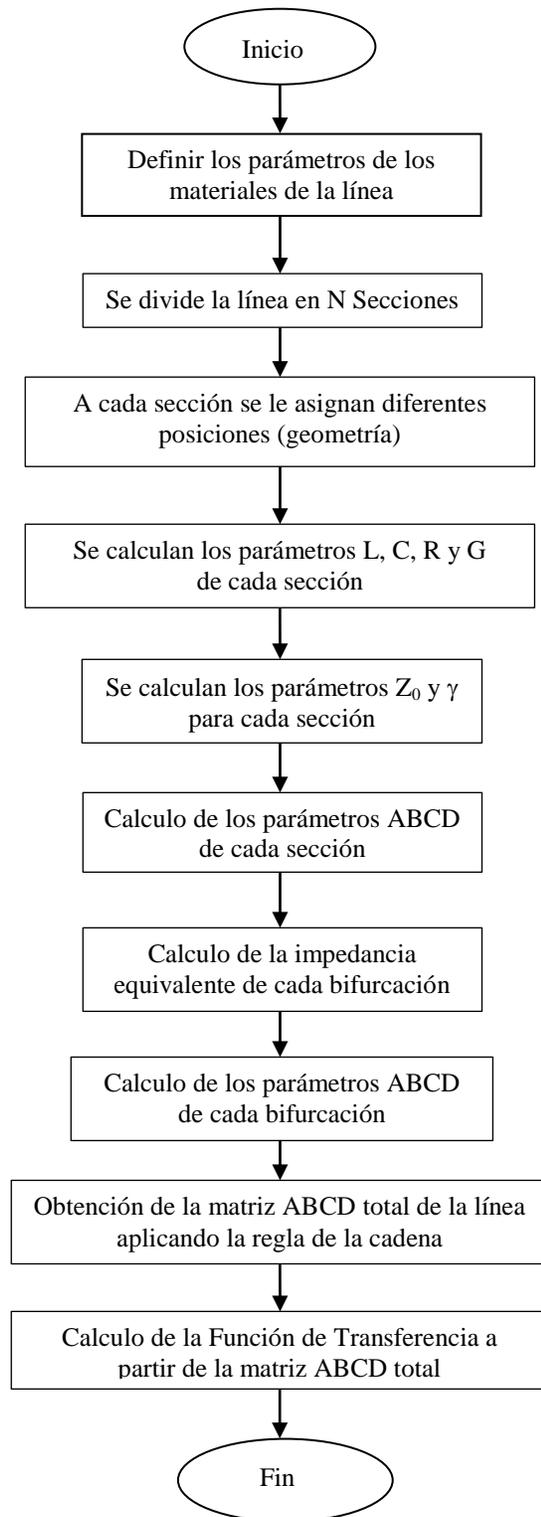


Figura D.8 Diagrama de flujo para la obtención de la F de T de la línea mediante el modelo de Parámetros de Transmisión para líneas no uniformes

REFERENCIAS

- [1] Francisco Manuel García Palancar, “Introducción a la Tecnología PLC”, Antena de Telecomunicación, Marzo 2005, Madrid España.
- [2] Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralf Lehnert, *Broadband Powerline Communications, Network Design*, John Wiley & Sons Ltd, Estados Unidos de America, 2004.
- [3] Klaus Doster, *Powerline Communication*, Prentice Hall PTR, 2001.
- [4] A. López-Morales, “Power Line Communications en la CFE” IEEE Soc. International Symposium, IPN México 2006.
- [5] David Schneider, “Is This the Moment for Broadband Over Power Lines?,” IEEE Spectrum, Julio 2009, pp. 13.
- [6] Stefano Gali, Anna Scaglione, Klaus Doster, “Broadband is Power: Internet Access Through the Power Line Network, guest editorial,” IEEE Communications Magazine, Mayo 2003, Vol. 41, No. 5, pp 82-83.
- [7] Martin Gebhardt, Frank Weinmann, Klaus Doster, “Physical and Regulatory Constraints for Communication over the Power Supply Grid,” IEEE Communications Magazine, Mayo 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 84-90.
- [8] George Jee, Con Edison, Ram Das Rao, Yehuda Cern, “Demonstration of the Technical Viability of PLC Systems on Medium- and Low-Voltage Lines in the United States,” IEEE Communication Magazine, Mayo 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 108-112.
- [9] Weilin Liu, Hanspeter Widmer, Philippe Raffin, “Broadband PLC Access Systems and Field Deployment in European Power Line Networks,” IEEE Communications Magazine, Mayo 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 114-118.
- [10] Rodolfo Neri Vela, *Lineas de Transmisión*, Mc. Graw Hill, primera edición, México 2009.

- [11] R. A. Chipman, *Teoría y Problemas de Líneas de Transmisión*, Mc. Graw Hill, primera edición, México 1971.
- [12] J. Dickinson y P. J. Nicholson, “Calculating the high frequency transmission line parameters of power cables”, in Proc. 1st International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC 97), Abril 1997, pp 127-133.
- [13] D. K. Cheng, *Fundamental of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley.
- [14] William H. Hayt Jr., *Teoría Electromagnetica*, Mc Graw Hill, quinta edición, México 2001.
- [15] Matthew N. O. Sadiku, *Elementos de Electromagnetismo*, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., segunda reimpresión, México, 2002.
- [16] Joseph A. Edminister, *Schaum’s Outlines of Theory and Problems of Electromagnetics*, Mc. Graw Hill, segunda edición, Estados Unidos de America, 1993.
- [17] Clayton R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons Inc., primera edición, Estados Unidos de America, 1992.
- [18] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan y T. T. Lie, “Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19 No. 3, Julio 2004.
- [19] I. C. Papaleonidopoulos, C. G. Karagiannopoulos, N. J. Theodorou, C. E. Anagnostopoulos, I. E. Anagnostopoulos, “Modelling of Indoor Low Voltage Power-Line Cables in the High Frequency Range”, in Proc. 2002 of the 6th International Symposium on Power Line Communication and its Applications, Atenas Grecia.
- [20] T.C. Banwell, S Galli, “On the Symmetry of the Power Line Channel,” IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications ISPLC 01, Malmo Suecia, abril 4-6, 2001, pp 325-330.

- [21] Tooraj Esmailian, Frank R. Kschischang, P. Glenn Gulak, "In-building power lines as high-speed communication channels: channel characterization and test channel ensemble", *International Journal of Communication Systems*, Mayo 2003, pp 381-400.
- [22] Manfred Zimmermann, Klaus Doster, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range", in Proc. 3rd International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC 99), Lancaster U.K., Marzo 1999, pp 45-51.
- [23] Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos, "Multipath Characterization of Indoor Power-Line Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20 No. 1, Enero 2005.
- [24] H. Philipps, "Modeling of powerline communication channels", in Proc. 3rd International Symposium Power-Line Communication and its Applications (ISPLC 99), Marzo 1999, pp 14-21.
- [25] T. C. Banwell, S. Galli, "A New Approach to the Modeling of the Transfer Function of the Power Line Channel," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, ISPLC 01, Malmo Suecia, Abril 4-6, 200, pp 319-324.
- [26] William H. Froehner, "Quick amplifier design with scattering parameters," *Electronics*, 16 de octubre de 1967.
- [27] Fritz Weinert, "Scattering parameters speed design of high-frequency transistor circuits," *Electronics*, 5 de septiembre de 1966.
- [28] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons Inc., Segunda edición, Estados Unidos de America, 1998.
- [29] Hewlett Packard "Operating the 4195A – Operating Manual" publicado el 1 de enero de 1994.

- [30] Petrus A. Janse Van Rensburg y Hendrik C. Ferreira, "Coupling Circuitry: Understanding the Functions of Different Components", 7th International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications, Kyoto Japon, Marzo 26-28, 2003, pp 204-209.
- [31] P. A. Janse Van Rensburg, "Effective Coupling for Power-Line Communications", A dissertation submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, as partial fulfillment of the requirements for the degree, University of Johannesburg, Enero 2008.
- [32] Despina Anastasiadou y Theodore Antonakopoulos, "An Experimental Setup for Characterizing the Residential Power Grid Variable Behavior", in Proc. 6th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 2002), Marzo 2002,
- [33] Rodolfo Araneo, Salvatero Celozzi, Giampiero Lovat, "Desing of Impedance Matching Couplers for Power Line Communications", EMC, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Agosto 2009, pp 64-69.
- [34] Osama Bilial, Er Liu, Yangpo Gao y Timo O. Korhonen, "Design of Power Broadband Coupling Circuits for Power-Line Communications," in Proc. 8th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, Zaragoza España, Abril 2004.
- [35] Heiko Haase, Torsten Steinmetz, and Jürgen Nitsch, "New Propagation Models for Electromagnetic Waves Along Uniform and Nonuniform Cables," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, Agosto 2004, pp. 345-352.
- [36] H. Haase y J. Nitsch, "Full-wave transmission line theory (FWTLT) for the analysis of three-dimensional wire-like structures," in Proc. 14th Int. Zurich Symp. Technical Exhibition Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, Febrero 2001, pp. 235-240.
- [37] J. Nitsch y S. Tkachenko, "High-Frequency Multiconductor Transmission-Line Theor

y,” Otto-von-Guericke University Magdeburg, Interaction Notes, Note 611, 30 de septiembre de 2009.

[38] J. Nitsch y S. Tkachenko, “Telegrapher Equations for Arbitrary Frequencies and Modes-Radiation of an Infinite, Lossless Transmission Line,” Otto-von-Guericke University Magdeburg, Interaction Notes, Note 574, 22 de octubre 2002.

[39] P. Besnier y P. Degauque “Electromagnetic Topology: Investigations of Nonuniform Transmission Line Networks,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 37, No. 2, Mayo 1995.

[40] H. Haase, “Full-Wave Field Interactions of Nonuniform Transmission Lines,” Otto-von-Guericke University Magdeburg, Dissertation, 2 de Marzo de 2005

[41] Arthur R. Von Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, Massachusetts Institute of Technology MIT PRESS, Estados Unidos de America, cuarta reimpresión, agosto 1966.

[42] B. M. Taréiev, *Física de los materiales dieléctricos*, editorial MIR, Moscú Rusia, primera edición, 1978

[43] OMERIN division principale, “*Características de los aislantes, hoja técnica*”, www.grupe-omerin.com/data_produits/pdf/ODP_ISOL_ES.PDF

[44] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, McGraw-Hill, tercera edición, México D.F., 1999

[45] Murray R. Spiegel y Larry J. Stephens, *Estadística*, Mc Graw Hill, 4a edición, México 2009.

[46] www.cadence.com

[47] H. Jardon A, *Electrónica para Sistemas de Comunicación y Medición*, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, departamento de Ingeniería Eléctrica, serie verde, octubre de 1989.

[48] Seymour Lipchutz, John Schiller, *Introducción a la Probabilidad y Estadística*, Mc Graw Hill, España, 2000.

[49] Seymour Lipchutz, *Probabilidad*, Mc Graw Hill, segunda edición, México, 2005.

[50] Jonh H. Mathews, Kurtis D. Fink, *Métodos Numéricos con MATLAB*, Person-Prentice Hall, Tercera edición, Madrid España, 2000.

[51] www.mathworks.com

[52] Holly Moore, *MATLAB para ingenieros*, Pearson Educación, primera edición, México 2007.