

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

MÉTODO DE DISEÑO DE FILTROS BASADO EN REDES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA UNA TOPOLOGÍA MONOFÁSICA CON TECNOLOGÍA BPL

Ing. RAFAEL ENRIQUE BALAGUERA HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES

Bogotá, Colombia
Abril 05 de 2016

MÉTODO DE DISEŃO DE FILTROS BASADO EN REDES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA UNA TOPOLOGÍA MONOFÁSICA CON TECNOLOGÍA BPL

Ing. RAFAEL ENRIQUE BALAGUERA HERNÁNDEZ

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. MSC. Dr. JOSÉ ROBERTO CÁRDENAS CASTIBLANCO

Línea de Investigación:

Comunicaciones de Banda Ancha por Línea de Potencia

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES

Bogotá, Colombia

Abril 05 de 2016

Gracias Dios por perdonar mis atrevimientos,
por retornar las bendiciones,
fortalecer mi fe e impulsar mi ánimo.

Agradecimientos

La gloria, la honra y la alabanza para mi Dios, a nuestro señor Jesucristo y al Espíritu Santo. A la Virgen María por interceder por mí.

Al Doctor José Roberto Cárdenas Castiblanco, director del proyecto, por su invaluable dirección, aportes y consejos.

Resumen

La geometría y configuración de una topología monofásica utilizada como canal para señales de comunicación, se habilita como línea de transmisión en parámetros distribuidos y se caracteriza con funciones de transferencia, para operar a frecuencias entre 1,8 MHz y 30 MHz, que corresponde al ancho de banda de un sistema con tecnología BPL.

Para determinar, modelar y diseńar los diferentes tipos de filtros que puedan presentar los canales que establecen las cargas derivadas de una topología monofásica modelada en líneas de transmisión para una vivienda, se utilizan técnicas de síntesis de redes, que reproducen las funciones de transferencia de los canales,en parámetros concentrados.

En el evento de presentarse un filtro en el canal que establece la carga derivada más alejada de la fuente BPL, se verifica su operación, reemplazando la carga derivada por el filtro estimado.El comportamiento esperado en la función de transferencia del canal con el reemplazo, infiere sobre la existencia de resultados similares en cuanto a relación Señal a Ruido y Capacidad de Canal, que validen el método propuesto.

Palabras Claves: comunicación por línea de potencia.

Abstract

The geometry and configuration of a monophasic topology used as channel for communication signals is enabled as transmission line in distributed parameters and is characterized by transfer functions, to operate at frequencies between 1.8 MHz and 30 MHz, which corresponds to bandwidth a system with BPL technology.

To determine, to model and design the different types of filters that present the channels that set the loads derived from a monophasic topology to model on transmission lines of a house, techniques are used synthesis of networks, which reproduce the transfer functions of the channels at lumped parameters.

In the event that in channel that establish the load derived farthest from BPL source, present filter, its operation is verified, replacing the load derived by estimated filter. The expected behavior in the transfer function of the channel with the replacement, inferred the existence of similar results in terms of signal to noise ratio and channel capacity, to validate the proposed method.

Keywords: power line communication

Índice general

Resumen III
Abstract V

Índice general **VII**

Índice de tablas **XI**

Índice de figuras **XIII**

Lista de Abreviaturas XIX

1. Introducción **1**

1.1. Definición del problema 2
1.2. Hipótesis 2
1.3. Pregunta de investigación 2
1.4. Objetivos 2
1.4.1. Objetivo General 2
1.4.2. Objetivos Específicos 2

2. Estado del arte o antecedentes **5**

2.1. Marco Teórico 7
2.1.1. Estructuras para una red eléctrica con tecnología BPL 7
2.1.2. Conceptos básicos sobre líneas de transmisión 9
2.1.3. Red Eléctrica 11
2.1.4. Conductor considerado 13
2.1.5. Parámetros primarios en una línea de transmisión de dos conductores . . 14
2.1.6. Línea de transmisión caso general 19

2.1.7. Consideraciones generales sobre funciones de transferencia y cálculo de filtros . . . 21
2.1.7.1. Filtro pasa bajo estándar . . . 23
2.1.7.2. Filtro pasa alto estándar . . . 25
2.1.7.3. Filtro pasa banda estándar . . . 26
2.1.8. Síntesis de redes . . . 28
2.1.8.1. Funciones reales positivas . . . 28
2.1.8.2. Modelos Cawer 1 y Cawer 2 . . . 29

3. Metodología para el desarrollo de la investigación 31
3.1. Uso del método Hipotético-Deductivo . . . 31
3.2. Diseño de la propuesta . . . 35
3.3. Características del conductor utilizado . . . 35
3.4. Longitud de tramos y obtención de parámetros . . . 35

4. Desarrollos teóricos propios [Aportes] 39
4.1. Soluciones hiperbólicas . . . 39
4.1.1. Consideraciones para cargas derivadas . . . 42
4.2. Representación en líneas de transmisión y solución de la topología monofásica . 44

5. Implementación de la propuesta 49
5.1. Algoritmo para implementar la metodología . . . 50
5.2. Funciones de transferencia . . . 53
5.3. Funciones de transferencia, topología de 3 Nodos . . . 57
5.3.1. Valor medio geométrico de las Funciones de transferencia, topología de 3 Nodos . . . 59
5.3.2. Características de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas en la topología de 3 Nodos . . . 62
5.3.3. Verificación del Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Topología de 3 Nodos . . . 67
5.3.4. Efecto del Filtro sobre la DEP de Señal en el canal que establece la carga del Nodo C.Topología de 3 Nodos . . . 71
5.4. Efecto de la DEP del Ruido en la Topología de 3 Nodos. . . . 73

5.5. Capacidad del Canal que establece la carga del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos 76
5.6. Funciones de transferencia, topología de 5 Nodos 81
5.6.1. Valor medio geométrico de las Funciones de transferencia, topología para 5 Nodos 84
5.6.2. Características de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas en la topología de 5 Nodos 88
5.6.3. Verificación del Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo E. Topología de 5 Nodos 96
5.6.4. Efecto del Filtro sobre la DEP de Señal en el canal que establece la carga del Nodo E.Topología de 5 Nodos. 102
5.7. Capacidad del Canal que establece la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos 103

6. Prueba de Hipótesis **107**

7. Alcances y limitaciones **113**

8. Conclusiones **115**

Bibliografía **119**

Índice de tablas

2.1. Ejemplo líneas de transmisión 9

2.2. Tabla de Conductores 13

3.1. Características de los conductores utilizados 35

3.2. Longitud tramos en la red considerados (m) 36

3.3. Resistencia para cada tramo de red en ($\mu\Omega$) 36

3.4. Inductancia para cada tramo de red en (μH) 36

3.5. Pérdidas de capacidad para cada tramo de red en (pF) 36

3.6. Conductancia para cada tramo de red en (pS) 36

5.1. Resumen: Funciones de Transferencia topología de 3 nodos 61

5.2. Valores utilizados para el cálculo del Ruido Generalizado 75

5.3. Resumen: Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo C, con y sin el Filtro. Topología de 3 nodos 80

5.4. Resumen: Capacidad de Canal carga derivada Nodo C, con y sin el Filtro. Topología de 3 nodos 80

5.5. Resumen: Funciones de Transferencia topología de 5 nodos 87

5.6. Resumen: Elementos de los Filtros Asociados a los canales que establecen las cargas derivadas. Topología de 5 nodos 96

5.7. Resumen: Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo E, con y sin el Filtro. Topología de 5 nodos 106

5.8. Resumen: Capacidad de Canal carga derivada Nodo E, con y sin el Filtro. Topología de 5 nodos 106

6.1. Resumen: Impedancia y Factor de Calidad. Filtro asociado al Canal de las cargas derivadas 110

Índice de figuras

2.1. Estructura de la Red BPL. 7
2.2. Onda electromagnética. 10
2.3. Topología monofásica como canal de señales de comunicación considerada en el análisis. 12
2.4. Representación de la topología monofásica en líneas de transmisión. 12
2.5. Configuración de conductores 4x10 mm^2 propuesta por Bostoen y Van der Wiel. 13
2.6. Modelo T de impedancias 14
2.7. Modelo π de admitancias 15
2.8. Resistencia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2 16
2.9. Inductancia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2 17
2.10. Pérdidas por capacidad por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2 17
2.11. Conductancia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2 18
2.12. Coeficiente de propagación. Conductor 25 mm^2 20
2.13. Impedancia característica. Conductor 25 mm^2 20
2.14. Modelo de dos puertas para un sistema 21
2.15. Modelo de dos puertas para una red pasa bajo 23
2.16. Diagrama de Bode. Magnitud y fase, filtro pasa-bajo del ejemplo 24
2.17. Modelo de dos puertas para una red pasa alto 25
2.18. Diagrama de Bode. Magnitud y fase filtro pasa-alto del ejemplo 26
2.19. Modelo de dos puertas para una red pasa banda 26
2.20. Valores considerados para el ejemplo, red pasa banda 27
2.21. Diagrama de Bode. Magnitud y fase filtro pasa-banda del ejemplo 27

3.1. Representación entrada y salida en la topología monofásica 33

3.2. Eventos esperados si se presenta un Filtro en el canal de una carga derivada . . 34
3.3. Impedancia total de la topología. Conductores: 10 mm^2 en derivaciones y 25 mm^2 en el backbone. 37
3.4. Corriente total de la topología. Conductores: 10 mm^2 en derivaciones y 25 mm^2 en el backbone. 37

4.1. Tramo de línea de transmisión 40
4.2. Red π recíproca para un tramo del alimentador 41
4.3. Tramo de línea de transmisión para una carga derivada 42
4.4. Red π recíproca para cargas derivadas 43
4.5. Representación de la topología monofásica en líneas de transmisión. Modelos de dos puertas 45
4.6. Red parcial de prueba para tres nodos 47
4.7. Red parcial de prueba para tres nodos, en modelos de dos puertas 47

5.1. Algoritmo - Parte I 50
5.2. Algoritmo - Parte II 51
5.3. Algoritmo - Parte III 52
5.4. Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Red de 3 Nodos 57
5.5. Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Red de 3 Nodos 58
5.6. Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Red de 3 Nodos 58
5.7. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VTX}$).Figura 5.1. Red de 3 Nodos 59
5.8. Interpretación del valor medio geométrico en la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VTX}$). Red de 3 Nodos. 60
5.9. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Figura 5.2. Red de 3 Nodos. 60
5.10. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Figura 5.3. Red de 3 Nodos. 61
5.11. Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_1$(f)|= H($\frac{VA}{Vsx}$). Red de 3 Nodos. 63
5.12. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_1$(f) |= H($\frac{VA}{Vsx}$). Red de 3 Nodos. 63

5.13. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo A. Red de 3 Nodos . . 64
5.14. Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vsx}$). Red de 3 Nodos. 64
5.15. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vsx}$). Red de 3 Nodos 65
5.16. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo B. Red de 3 Nodos . . 65
5.17. Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$). Red de 3 Nodos. 66
5.18. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$). Red de 3 Nodos 66
5.19. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 3 Nodos . . 67
5.20. Valores de los elementos del Filtro asociado al canal de la Carga del Nodo C. Red de 3 Nodos 68
5.21. Impedancias del Filtro y Característica,asociadas al canal de la carga derivada del Nodo C, en función de la frecuencia. Red de 3 Nodos. 68
5.22. Fases Impedancia del Filtro y Característica, en función de la frecuencia. Red de 3 Nodos. 69
5.23. Función de Transferencia del Canal asociado a la carga del Nodo C $|H_{CANAL}(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$), con y sin el filtro. Red de 3 Nodos. 71
5.24. DEP de Señal en el canal establecido por la carga del Nodo C, con y sin el Filtro Red de 3 Nodos. 73
5.25. DEP del RUIDO considerada para la Topología Monofásica propuesta como canal BPL. 74
5.26. DEP recibida, ruido y relación SEŃAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos 76
5.27. Modelo de Canal. Red de 3 Nodos 77
5.28. Subcanales (C_1,C_2,C_3), asociados al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 3 Nodos 78
5.29. Función de Transferencia del canal asociado al backbone, con y sin el Filtro estimado. Red de 3 Nodos 78
5.30. Relación Señal a Ruido en el Canal que establece la carga derivada del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos 79
5.31. Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Red de 5 Nodos 81

5.32. Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Red de 5 Nodos 82
5.33. Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Red de 5 Nodos 82
5.34. Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{VS}$).Red de 5 Nodos 82
5.35. Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VS}$).Red de 5 Nodos 83
5.36. Funciones de Transferencia $|H_k(f)|$= H($\frac{Vk}{VS}$).Red de 5 Nodos 83
5.37. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Figura 5.31. Red de 5 Nodos 84
5.38. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Figura 5.32. Red de 5 Nodos 85
5.39. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Figura 5.33. Red de 5 Nodos 85
5.40. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{VS}$).Figura 5.34. Red de 5 Nodos 86
5.41. Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VS}$).Figura 5.35. Red de 5 Nodos 86
5.42. Interpretación del valor medio geométrico para la Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VTS}$). Red de 5 Nodos 87
5.43. Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vs}$). Red de 5 Nodos 89
5.44. Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vs}$). Red de 5 Nodos 89
5.45. Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vs}$). Red de 5 Nodos 90
5.46. Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{Vs}$). Red de 5 Nodos 90
5.47. Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{Vs}$). Red de 5 Nodos 91
5.48. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 2 sobre $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vs}$). Nodo A - Red de 5 Nodos. 91
5.49. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vs}$). Nodo B - Red de 5 Nodos 92
5.50. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vs}$). Nodo C - Red de 5 Nodos. 92
5.51. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{Vs}$). Nodo D - Red de 5 Nodos 93

5.52. Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{Vs}$). Nodo E - Red de 5 Nodos. 93
5.53. Diagrama de Bode Funciones de Transferencia asociadas a los canales de las cargas derivadas. $|H_k(f)|$= H($\frac{Vk}{Vs}$). Red de 5 Nodos 94
5.54. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo A. Red de 5 Nodos . . 94
5.55. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo B. Red de 5 Nodos . . 94
5.56. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 5 Nodos . . 95
5.57. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo D. Red de 5 Nodos . . 95
5.58. Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos . . 95
5.59. Valores de los elementos del Filtro asociado al canal que establece la Carga del Nodo E. Red de 5 Nodos. Fuente: el autor . . . 97
5.60. Impedancias del Filtro y Característica, asociadas al canal de la carga derivada del Nodo E, en función de la frecuencia. Red de 5 Nodos. 97
5.61. Fases Impedancia del Filtro e Impedancia Característica, en función de la frecuencia. Red de 5 Nodos. 98
5.62. Función de Transferencia del Canal asociado al Backbone $|H_{CANAL}(f)|$= H($\frac{VE-VA}{Vsx}$), con y sin el Filtro en la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos. 100
5.63. Función de Transferencia del Canal asociado a la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos. 100
5.64. DEP de Señal en el canal establecido por la carga del Nodo E, con y sin el Filtro Red de 5 Nodos. 102
5.65. DEP recibida, ruido y relación SEŃAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos. 103
5.66. Subcanales (C_1,C_2,C_3,C_4,C_5), asociados al canal que establece la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos. 104
5.67. Función de Transferencia del canal asociado al backbone, con y sin el Filtro estimado. Red de 5 Nodos. 104
5.68. Relación Señal a Ruido en el Canal que establece la carga derivada del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos 105

6.1. Transformación de funciones de transferencia para el canal que establece la carga derivada 108

6.2. Reemplazo de la Impedancia Característica por la Impedancia del Filtro, en el canal establecido por las cargas derivadas 108
6.3. Transferencia Máxima de Potencia en función de la Impedancia de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos 109
6.4. Transferencia Máxima de Potencia en función de la Impedancia de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos 109
6.5. Impedancia del Filtro, canal de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos 110
6.6. Impedancia del Filtro, canal de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos 110
6.7. Factor de Calidad, Filtro canal Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos . . 111
6.8. Factor de Calidad, Filtro canal Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos . . 111
6.9. Comparación de Potencias Recibidas con y sin el Filtro en el canal de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos 112
6.10. Comparación de Potencias Recibidas con y sin el Filtro en el canal de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos 112

Lista de Abreviaturas

A.C.	**Alternating Current**
AWG	**American Wire Gauge**
BPL	**Broadband over Power Lines**
CBN	**Color Background Noise**
CPE	**Customer Premises Equipment**
dB	**Decibel o Decibelio**
DEP	**Densidad Espectral de Potencia**
EMI	**Electromagnetic Interference**
EMT	**Electromagnetic Transversal**
FCC	**Federal Communications Commission**
FPT	**Frecuencia Picos Transitorios**
GBN	**Generalized Background Noise**
IEEE	**Institute of Electrical and Electronics Engineers**
KHz	**Kilo Hertz**
KV	**Kilo Voltios**
mA	**mili-Amperios**
MATLAB	**MATRIX LABORATORY**
MHz	**Mega Hertz**
mW	**mili-Watts**
NN	**Narrowband Noise**
NTC	**Norma Técnica Colombiana**
OFDM	**Orthogonal Frecuency - Division Multiplexing**
PLC	**Power Line Communication**
PLT	**Power Line Telecommunication**

p.u.	**por unidad**
PVC	**Policioruro de Vinilo**
RC	**Resistencia-Condensador**
RTH	**Resistencia Thevenin**
Senh	**Seno hiperbólico**
Vac	**Voltios alternating current**

Capítulo 1

Introducción

Utilizar las redes internas de energía eléctrica de una vivienda como canal de transmisión de señales de comunicación entre 1,8 MHz y 30 MHz, introduce un marco conceptual y de desarrollo tecnológico que cambia su denominación pero el fin es el mismo. Se conoció como PLT (*Power Line Telecommunication*), telecomunicaciones por líneas de potencia eléctrica, se utiliza también PLC (*Power Line Communication*), comunicación mediante línea de potencia o cable eléctrico y actualmente BPL (*Broadband Power Line*), banda ancha sobre líneas de potencia.

Existen diferentes restricciones de las redes eléctricas internas como canal para las señales de comunicación:

1. Problemas de compatibilidad electromagnética (ruido, atenuación, distorsión, acoplamiento) porque su diseño es para transmitir potencia eléctrica.
2. Configuraciones: redes áreas y subterráneas.
3. Voltaje de operación para el usuario: varía entre 110 Vac - 1 KVac,para uso residencial, comercial o industrial.
4. Diseño de topologías: monofásico, bifásico, trifásico, con puesta a tierra.

En este estudio se determina un método de diseño de filtros en redes de líneas de transmisión, utilizando técnicas de síntesis de redes, para determinar los diferentes tipos de filtros asociados al canal que establecen las cargas derivadas, en topologías monofásicas de 3 y 5 nodos; se espera que los filtros reproduzcan la función de transferencia del canal.

1.1. Definición del problema

Un aspecto que no abordan estudios sobre topologías monofásicas modeladas en líneas de transmisión [parámetros distribuidos] y con sistema BPL, es la posibilidad de reproducir la función de transferencia del canal que establecen las cargas derivadas, sin modificar los parámetros del sistema,utilizando técnicas de síntesis de redes eléctricas, que permitan modelar en parámetros concentrados,los posibles comportamientos de filtro, que presente el canal.

1.2. Hipótesis

Es posible determinar, modelar y diseñar diferentes tipos de filtros pasivos, asociados a las funciones de transferencia del canal que establecen las cargas derivadas en una topología monofásica, utilizando técnicas de síntesis de redes eléctricas, que permiten modelar en parámetros concentrados.

1.3. Pregunta de investigación

¿Es posible desarrollar un método de diseño incorporando las características eléctricas y físicas de una red de líneas de transmisión monofásica, que cumpla con las especificaciones de un filtro?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar un método para el diseño de los diferentes tipos de filtros, presentes en el canal que establecen las cargas derivadas en una topología monofásica para una vivienda con sistema BPL.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Determinar por la configuración geométrica entre nodos adyacentes de la topología monofásica, los parámetros que caracterizan una línea de transmisión al inyectar señales eléctricas con frecuencia de operación entre 1,8 MHz y 30 MHz.

2. Evaluar el conjunto de funciones de transferencia de los canales que establecen las cargas derivadas en las líneas de transmisión, para determinar, modelar y diseñar los diferentes tipos de filtros que las puedan reproducir.

3. Comprobar la operación de los filtros para determinar el impacto que producen sobre el canal de comunicación.

Capítulo 2

Estado del arte o antecedentes

Análisis y pruebas realizados por Bostoen y Van de Wiel [1] sobre conductores [4 x 95 mm^2 y 4 x 150 mm^2], material aluminio; conductores [4 x 10 mm^2 y 4 x 25 mm^2], material cobre, logran simular los parámetros eléctricos para obtener funciones de transferencia parecidas a las reales obtenidas sobre una red interior [indoor]. Utilizan configuración de cuatro conductores, que lo asimilan a un sistema monofásico. Los anteriores calibres de conductores no aparecen en el listado estándar de la normatividad colombiana [2], [3], [4].

En la Universidad Nacional, existe un estudio realizado en líneas eléctricas subterráneas e interiores (vivienda, fábrica, empresa) [5], variando la frecuencia sobre el canal hasta 20 MHz y aplicando modelos por asociación a un cable coaxial (en topologías trifásica tetrafilar y monofásica bifilar).

Para el análisis de los parámetros de impedancia característica y atenuación, la prueba para el circuito monofásico se realizó para calibre 14 AWG en tubería PVC. El resultado del estudio muestra que la atenuación no alcanza valores críticos para las frecuencias hasta de 20 MHz para una longitud de 1 km y concluye que estas redes podrían emplearse sin mayores dificultades para el transporte de señales en sistemas BPL.

Cárdenas [6], trabaja sobre las condiciones Bostoen y Van de Wiel [1] "presenta una solución en la cual los transceptores conectados a las tomas de una residencia cooperan para modificar la función de transferencia del canal entre un transmisor y un receptor de la red, haciendo uso

de algoritmos que se basan en la variación de la distancia de la línea de transmisión que los conecta al cableado intramuros de la residencia, así como en la carga que es presentada en la terminación de cada una de estas líneas. Mediante la aplicación de principios teóricos se lograron mejoras en condiciones prácticas de hasta 26.72 dB en la densidad espectral de potencia (DEP) de transmisión para redes residenciales con configuraciones de canal de relevo o canal sencillo, se determina la amplificación que produce el canal en función de la distancia a partir de funciones de transferencia".

En diciembre de 2010, la IEEE publicó el estándar 1901, que oficializó la tecnología y donde se especificó una densidad espectral de potencia (DEP) de -55 dBm/Hz. Aunque se disminuye la DEP, este valor se aleja del valor estimado de -72 dBm/Hz, que sería necesario para cumplir con lo especificado por la FCC.

En la tesis de Matsunaga [7], se nombra el análisis de filtro de entrada y los coeficientes de reflexión y atenuación de las líneas de transmisión hogareñas subterráneas, con cables NAYY, utilizando un emulador.

Cada uno de estos trabajos y múltiples publicaciones,trabajan la función de transferencia del canal, lo que no desarrollan, es la posibilidad de reproducir la función de transferencia del canal, através de redes en parámetros concentrados. La dificultad encontrada al utilizar métodos analíticos [sistemas de ecuaciones de red, respuesta al impulso] está, en modificar los parámetros del sistema para obtener respuestas similares. La versatilidad del método propuesto en esta investigación, está en reproducir la función de transferecia del canal, apartir del comportamiento del sistema [sin modificarlo] utilizando la técnica de ***síntesis de redes*** [8], para obtener la red del Filtro asociado al canal en parámetros concentrados y probar su operación desde:la función de transferencia del canal,DEP de Señal, capacidad de canal [9] y la transferencia máxima de potencia, para diferentes potencias de transmisión.

2.1. Marco Teórico

En esta parte del estudio, se muestran las consideraciones conceptuales y principios teóricos relacionados con las redes BPL hogareñas, utilizados para lograr los objetivos de este trabajo.

2.1.1. Estructuras para una red eléctrica con tecnología BPL

La tecnología BPL permite ofrecer servicios de telecomunicaciones a través de la red eléctrica. Consiste de una transmisión bifilar utilizando como línea de transmisión el cable eléctrico, inicialmente se pensó para transmitir energía eléctrica de baja frecuencia y no información en formato digital. Esta tecnología ofrece servicios de banda ancha basados en tecnología IP (internet protocol), accediendo el usuario final a los contenidos a través de la red eléctrica de baja tensión mediante un MODEM BPL, es decir Internet en el tomacorriente.

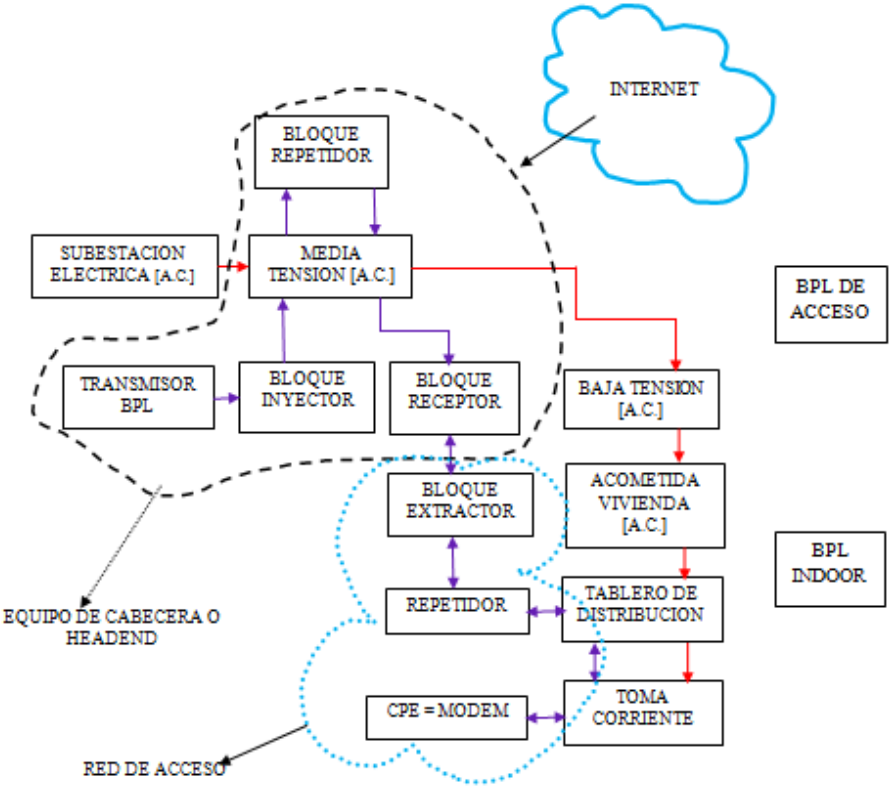


Figura 2.1: Estructura de la Red BPL.
Fuente: [10] Zimmerman-Dostert

Esta tecnología cubre únicamente la última milla del acceso de los usuarios, por lo que necesita del soporte de una red de datos que permita acceder a los usuarios a los contenidos y servicios de Internet. La Figura 2.1. muestra la estructura de la Red BPL, a continuación se describe la misma.

La red BPL tiene definidas dos estructuras sobre las cuales pueden otorgar beneficios de Banda Ancha a múltiples usuarios [6], [10], [11]. La primera estructura es conocida como "BPL de Acceso" y comprende el camino que va desde la subestación eléctrica, pasando por las líneas de Media y Baja Tensión hasta la acometida de la vivienda del usuario. La segunda estructura comprende la red eléctrica interna del inmueble, conocida como "BPL In-Door".

BPL de Acceso es una estructura que está definida por tres bloques básicos:

- El primer bloque se denomina bloque inyector, se encarga de inducir la señal digital (datos, video, sonido) puede ser en tecnología OFDM (Orthogonal Frecuency Division Multiplex), sobre la señal de 60 Hz que viaja a través de los cables de Media Tensión. Este primer bloque esta compuesto por un equipo cabecera o "HeadEnd" y por un acoplador que puede ser capacitivo o inductivo. El acoplador en este bloque es un elemento que logra que el tendido eléctrico pueda transmitir señales de comunicaciones sobre su estructura. El HeadEnd es la interfaz entre el backbone del proveedor de servicios de valor agregado y la red eléctrica.

- El segundo bloque en importancia es el bloque receptor. Este bloque es el encargado de capturar la señal de comunicaciones que viaja sobre la señal eléctrica de 60 Hz con el fin de retransmitir los datos, ya sea a otro equipo de comunicación o actuando como Bypass de los transformadores de distribución. Este bloque se caracteriza por ser versátil, porque su diseño establece la comunicación entre el usuario final y la red de datos.

- Como en toda estructura de telecomunicaciones, se requiere regenerar la señal cuando esta se atenúa ya que debe recorrer largos tramos a través de un medio determinado. Para mantener una señal robusta y que posea un alcance mayor al de las capacidades de los equipos utilizados, se agrega un tercer bloque conocido como repetidor, que se encarga de regenerar la seÃśal de

datos atenuada e interferida a consecuencia de ruidos e impedancias a lo largo del cableado.

BPL In-Door es la estructura en donde se define una red local dentro del inmueble del usuario utilizando la red eléctrica del mismo. Cada tomacorriente se convierte en un puerto de comunicaciones que puede ser aprovechado para conectar un CPE (Customer Premises Equipment) equipo local del cliente, que será la interfaz entre el Cliente y el proveedor de Servicios de Valor Agregado. El CPE, es el MODEM (modulador demodulador de señales OFDM) que utiliza el usuario final para enviar y recibir datos a través de la red eléctrica. Este equipo se comunica con el Bloque Extractor de la estructura de Acceso y de ser necesario se regenera la señal a través de un repetidor en el tablero de distribución.

2.1.2. Conceptos básicos sobre líneas de transmisión

Las líneas de transmisión se utilizan para transmitir energía eléctrica y señales de comunicación de un punto a otro de un sistema. La línea básica de transmisión conecta una fuente a una carga, la Tabla 2.1. muestra algunos ejemplos de líneas de transmisión.

Tabla 2.1: Ejemplo líneas de transmisión

FUENTE	CARGA
TRANSMISOR	ANTENA
INTEGRADOR	NÚCLEO DE MEMORIA DE UN P.C
CENTRO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÃLCTRICA	SUBESTACIÓN
ANTENA DE TELEVISIÓN	RECEPTOR
CANAL DEL SOPORTE DE UN REPRODUCTOR DE CD	ENTRADA AL PREAMPLIFICADOR
ACOMETIDA DE UNA VIVIENDA	NODOS, LÍNEAS, ALUMBRADO, TOMAS

Fuente: elaboración propia

Las distribuciones de campo para una línea de transmisión uniforme se conocen como ondas electromagnéticas transversales (EMT) Figura 2.2, los campos eléctrico y magnético Ez y Hy son perpendiculares a la dirección de propagación Ux o se encuentran en un plano transversal [12], [13].

En la línea de transmisión se definen las variables de voltaje y corriente de operación para hallar la solución de las ecuaciones del campo electromagnético [características de línea, sujetas

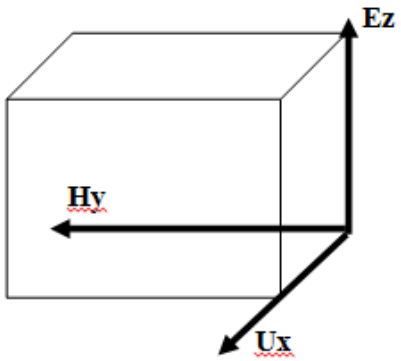


Figura 2.2: Onda electromagnética.
Fuente: [12],página 375

a condiciones de frontera según su geometría], determinar las constantes de propagación, los coeficientes de reflexión, los parámetros de la línea y su impedancia característica.

En el análisis de propagación de una onda electromagnética a través de un conductor en un sistema BPL para una topología monofásica de una vivienda, se establecen los modelos y leyes que caracterizan la propagación en sistemas de conductores paralelos. Un método que no se aplica en estas topologías es el cuasiestacionario [autoinducción y capacitancia], donde se asume que la corriente es la misma en todo su trayecto para un tiempo específico, este método es conocido como Parámetros Concentrados, donde las dimensiones físicas de sus componentes, incluyendo los hilos de conexión, son mucho menores que la longitud de onda de la energía manejada por el circuito.

Como la energía en un sistema eléctrico de una vivienda se distribuye en topologías tipo bus con diferente impedancia característica, la intensidad de corriente va a tomar diferentes valores para un determinado tiempo, por esta razón en el canal se aplica el modelo de Parámetros Distribuidos [12], [13], [14], donde las dimensiones del circuito y sus componentes son comparables a la longitud de onda o menores que esta y los parámetros de la línea de transmisión están distribuidos uniformemente a lo largo de ella, la corriente va a tomar diferentes valores según los trayectos y operación del sistema.

2.1.3. Red Eléctrica

Las redes eléctricas son las más antiguas y extensas en el mundo y particularmente en Colombia, aún en zonas remotas existe el tendido eléctrico [2], [3], [4]. La red eléctrica consta de varios elementos que se describen a continuación:

- El generador de energía eléctrica [hidráulica, térmica], genera la energía que se transporta hacia subestaciones por cables de alta tensión. El voltaje es superior a los 150 KV y produce un ambiente de ruido, porque la frecuencia de oscilación de esta tensión sobre la línea es inestable por períodos cortos y provoca interferencias sobre una señal digital (datos, video, sonido).

- Las líneas de media tensión alimentadas por subestaciones eléctricas, cambian las características en voltaje y corriente de la electricidad del generador, reducen el voltaje a rangos entre 1KV y 60 KV. Desde las subestaciones y utilizando el tendido eléctrico media tensión se inicia la transmisión de señales digitales (datos, video, sonido) en alta velocidad, porque es un ambiente manejable respecto al ruido, estas líneas proveen de energía a las ciudades.

- El siguiente elemento abastece de fluido eléctrico al usuario, es el transformador de baja tensión. Para la transmisión de señales digitales, este elemento es un obstáculo porque con señales de alta frecuencia el transformador actúa como filtro pasa bajos y la señal se atenúa fácilmente, a los transformadores se les aplica un "by pass".

-Finalmente la red eléctrica interna de cada vivienda se constituye en una red para la transmisión de señales digitales y cada tomacorriente un punto de comunicación. En este trabajo se considera para su análisis la topología monofásica que aparece en la **Figura 2.3** donde se muestran los elementos de conexión o tomacorriente.

La línea de transmisión en parámetros distribuidos para la topología monofásica considerada en esta investigación, utiliza el modelo de dos conductores.Cada tramo de red **Figura 2.4**, [VTx-ZTx-A]; [A-B]; [B-ZL1]; [B-C]; [C-ZL2]; [C-D]; [D-ZL3]; [D-E]; [E-ZL4], se modela desde su disposición geométrica o parametrización. Cada tramo visto como línea de transmisión, tiene sus propios parámetros primarios,interconectando las diferentes líneas de transmisión con sus

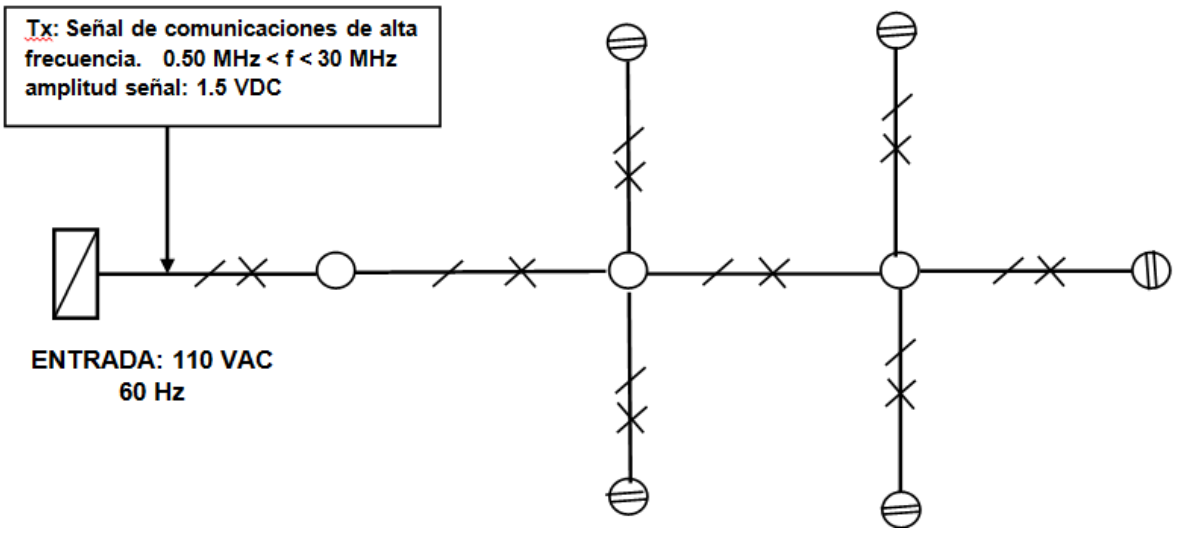


Figura 2.3: Topología monofásica como canal de señales de comunicación considerada en el análisis.

Fuente: el autor

cargas, se tiene un sistema de líneas de transmisión donde se puede controlar su operación por distancia y por frecuencia.Las impedancias de fuente y de carga ZTx, ZL1, ZL2, ZL3, ZL4, se asumen igual a la impedancia característica del tramo correspondiente, concepto que se sustenta y describe en el **Capítulo 4**. La **Figura 2.4** muestra cada tramo de la topología monofásica considerada en esta investigación, representado en líneas de transmisión.

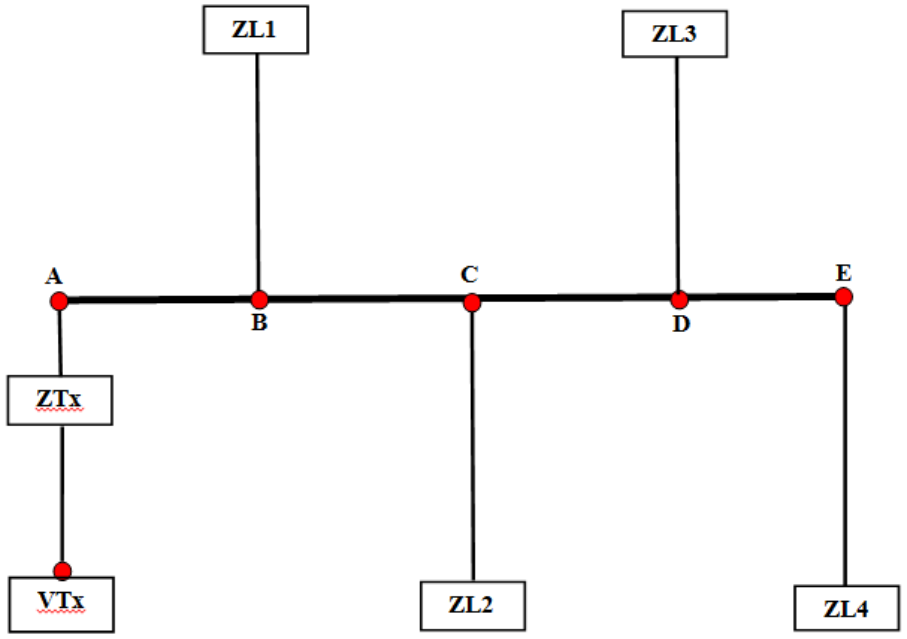


Figura 2.4: Representación de la topología monofásica en líneas de transmisión.
Fuente: el autor

2.1.4. Conductor considerado

Los conductores utilizados y analizados en este trabajo, corresponden a la configuración para cables de conexión 4x10 mm^2 y 4x25 mm^2, propuesta y probada por Bostoen y Van de Wiel [1], que se observa en la Figura 2.5. Bostoen y Van de Wiel, realizaron pruebas de laboratorio sobre conductores de cobre y aluminio, para cables de conexión de 4x10 mm^2, 4x25 mm^2 y 4x95 mm^2, que se asimilan a una conexión monofásica de dos conductores. En la Tabla 2.2 aparece el listado de conductores,los conductores validados se identifican con las letras A, B y C.

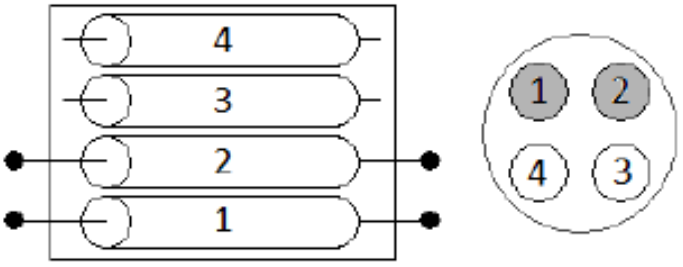


Figura 2.5: Configuración de conductores 4x10 mm^2 propuesta por Bostoen y Van der Wiel. Fuente: [1],página 172

Tabla 2.2: Tabla de Conductores

Calibre	Area (mm^2)
12 AWG	3.31
10 AWG	5.27
8 AWG	8.34
A	**10.00**
6 AWG	13.26
4 AWG	21.14
B	**25.00**
3/0 AWG	84.90
C	**95.00**
4/0 AWG	107.09

Fuente: elaboración propia

2.1.5. Parámetros primarios en una línea de transmisión de dos conductores

Los modelos aplicados en el análisis e interpretación del conductor propuesto, se conocen como modelos de dos puertas. En este trabajo se utilizan los modelos T y π. Su representación sin carga aparece en las Figuras No. 2.6 y 2.7, [15].

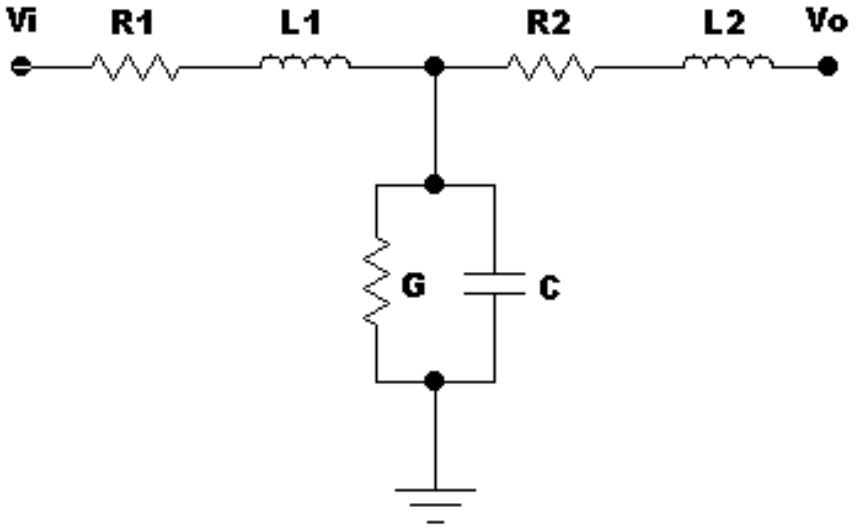


Figura 2.6: Modelo T de impedancias
Fuente: [12],página 418

Donde R1, L1 y R2, L2 son impedancias de entrada y salida por unidad de longitud, compuestas por la resistencia y la inductancia del conductor en serie y G, C la admitancia de la línea de transmisión por unidad de longitud, compuesta por la capacitancia y admitancia del conductor en paralelo, Vi y Vo son los voltajes de entrada y salida respectivamente. En la Figura 2.7. en el modelo π, Y1 y Y3 son admitancias de entrada y salida y Yd la admitancia de transferencia.

En este estudio se utiliza el modelo de la Figura 2.6. para parametrizar los elementos de la línea de transmisión en cada tramo [12]. El modelo de la Figura 2.7. se utiliza para el análisis propuesto en cada nodo, en cada tramo y en toda la topología monofásica de líneas de transmisión propuesta en la Figura 2.3.

De la Figura 2.6, las unidades de las impedancias Z1 y Z2, en *Ohmios* [Ω] y los conducto-

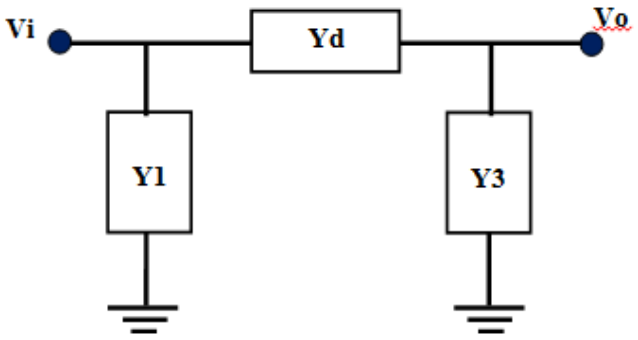


Figura 2.7: Modelo π de admitancias
Fuente: [15],página 524

res se dimensionan por longitud, las impedancias se indican en una línea como **z1**[Ω/m] y **z2**[Ω/m] como aparece en la relación (2.1).

$$Z = z(\Omega/m) * longitud(m); (Ohmios) \tag{2.1}$$

La admitancia Y en mhos o siemens [℧], se dimensiona por longitud **y**(℧ /m)

$$Y = y(℧/m) * longitud(m); (mhos) \tag{2.2}$$

Cada elemento de la Figura 2.6. que conforma las impedancias y admitancias por unidad de longitud ΔX, se presenta así:

$$Z = R * \Delta X + j\omega L * \Delta X; (Ohmios) \tag{2.3}$$

$$Y = G * \Delta X + j\omega C * \Delta X; (mhos) \tag{2.4}$$

Las expresiones para cada uno de los elementos que componen las impedancias y la admitancia en cada tramo de línea de transmisión son:

Resistencia R:

$$R = r * \sqrt{f}; (Ohmios) \tag{2.5}$$

En (2.5), el valor calculado de la constante r es igual a 79.1 $\mu\Omega.m^{-1}$. La Figura 2.8. muestra la resistencia del conductor de 25 mm^2 para 100 metros de conductor en función de la frecuencia.

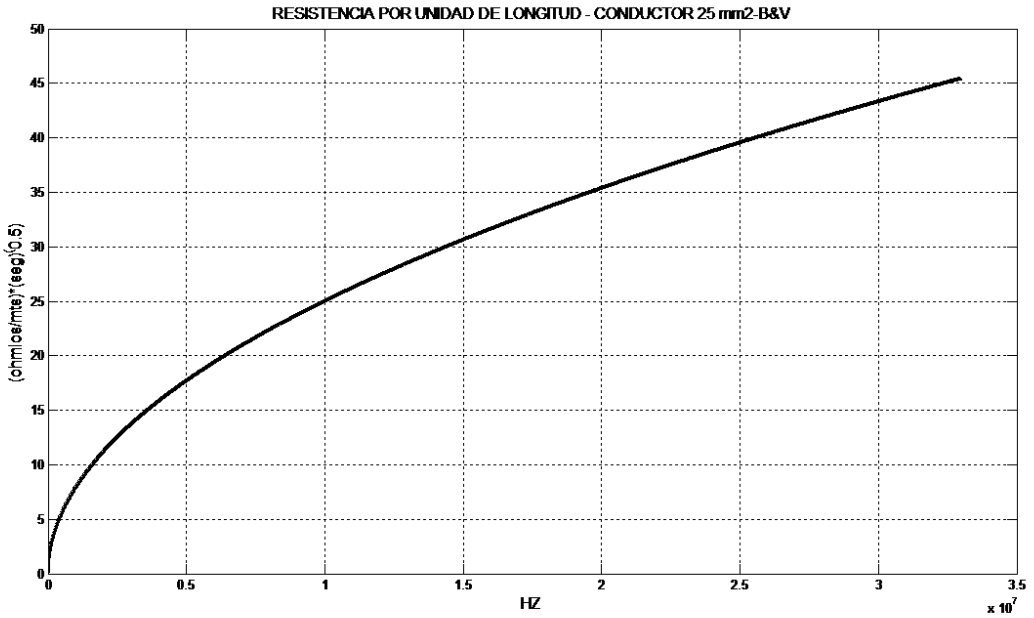


Figura 2.8: Resistencia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

Inductancia L:

$$L = l1 + \frac{l2}{\sqrt{f}}; (\frac{\mu H * \sqrt{Hz}}{m}) \tag{2.6}$$

En la expresión (2.6), el valor calculado de las constantes l1 y l2 son 0,248 $\mu H.m^{-1}$ y 16,8 $\mu H.m^{-1}.s^{-1/2}$, respectivamente.

La Figura 2.9. muestra la inductancia del conductor de 25 mm^2 para 100 metros de conductor en función de la frecuencia.

Las pérdidas por capacidad C son:

$$C = c; (\frac{pF}{m}) \tag{2.7}$$

En la expresión (2.7), el valor calculado de la constante c es 111 $pF.m^{-1}$. La Figura 2.10. muestra las pérdidas de capacidad conductor 25 mm^2 para 100 metros en función de la frecuencia.

Expresión para la conductancia G :

$$G = g * f; (\frac{pSiemens * Hz}{m}) \tag{2.8}$$

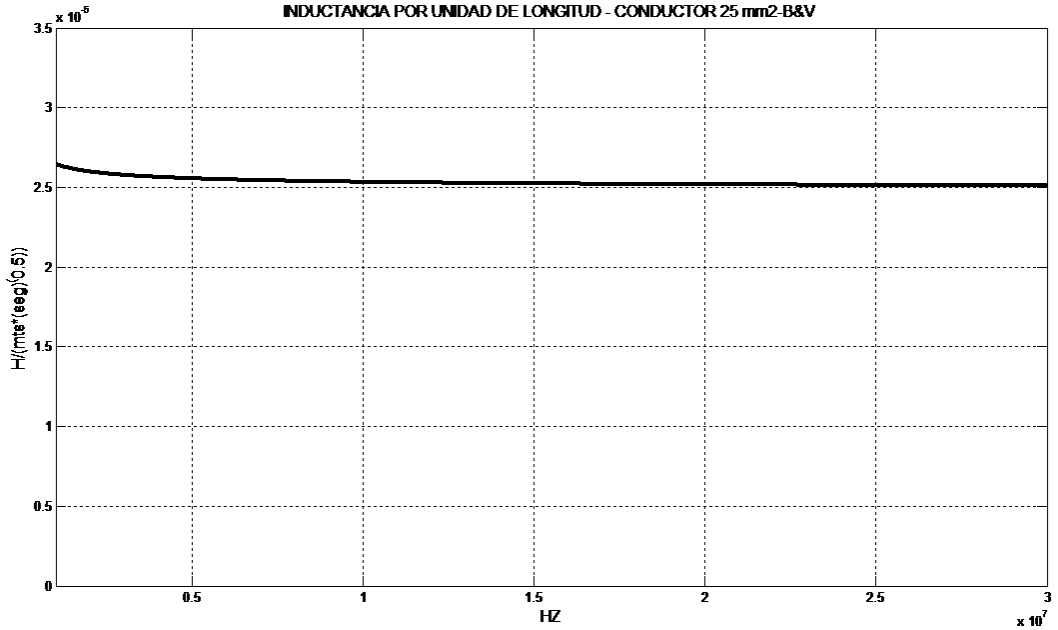


Figura 2.9: Inductancia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

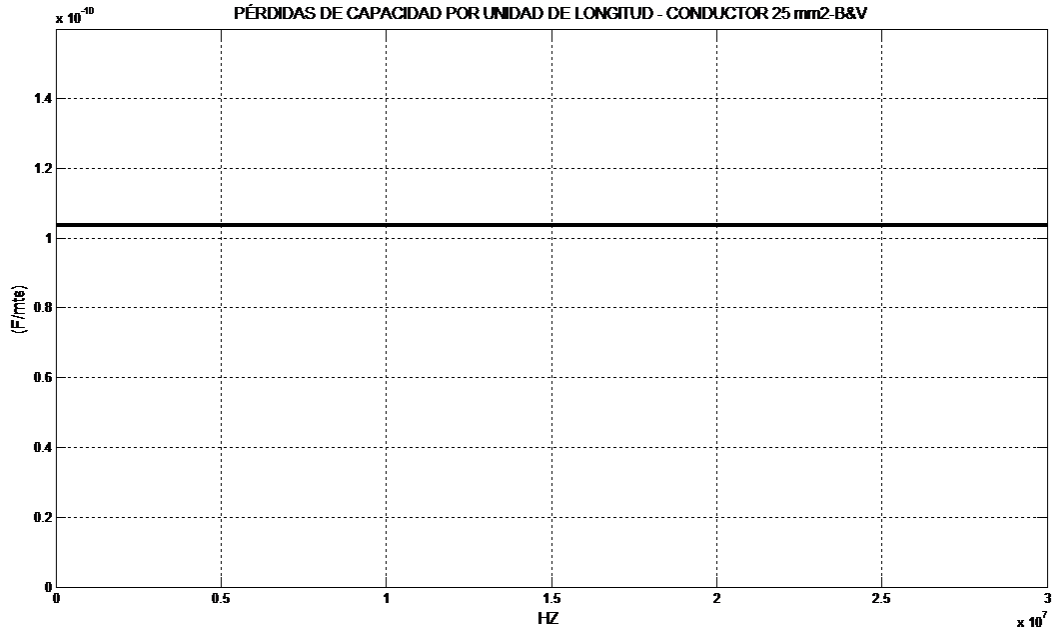


Figura 2.10: Pérdidas por capacidad por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

En la expresión (2.8), el valor calculado de la constante g es 8.57 $pS.m^{-1}.Hz$. La Figura 2.11. muestra la conductancia para 100 metros del conductor de 25 mm^2 en función de la frecuencia.

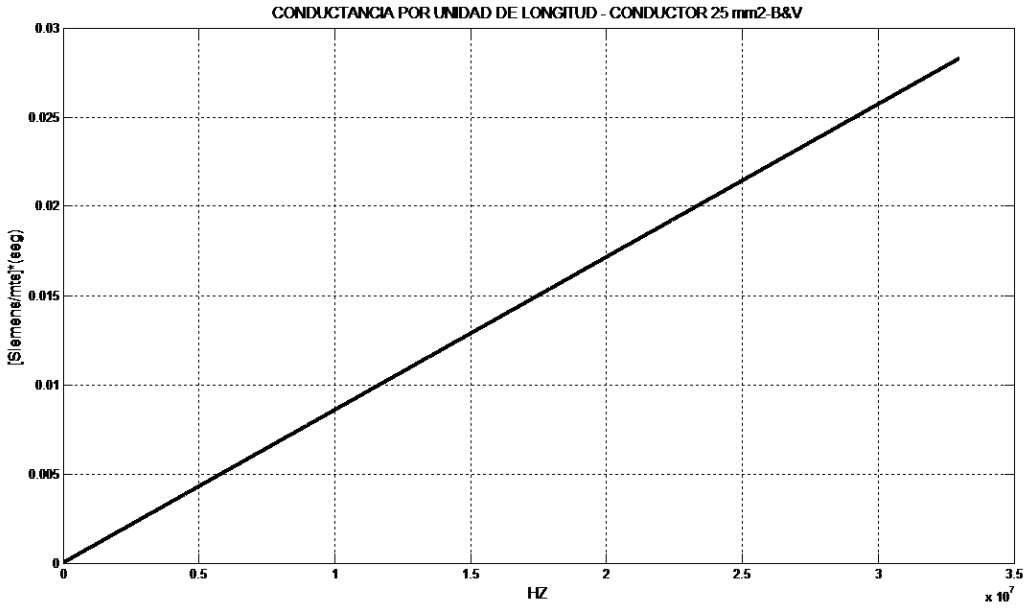


Figura 2.11: Conductancia por unidad de longitud. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

Los resultados para el cálculo de los parámetros se hallaron con el **Programa # 1** (Ver Anexo de programas).

2.1.6. Línea de transmisión caso general

Para un tramo de red de la **Figura 2.4** visto como el modelo de la **Figura 2.3** y aplicando (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8), se obtienen las ecuaciones diferenciales de la línea de transmisión por unidad de longitud, [13], [16]. La ecuación (2.9) muestra la suma de corrientes en un nodo y la ecuación (2.10) corresponde a la suma de tensiones de lazo abierto, estos son la esencia de los modelos aplicados en este trabajo:

$$\frac{-di}{dx} = G * v + C * \frac{dv}{dx} \tag{2.9}$$

$$\frac{-dv}{dx} = R * i + L * \frac{di}{dx} \tag{2.10}$$

Las ecuaciones (2.9) y (2.10) se transforman en las ecuaciones (2.11) y (2.12) utilizando los operadores complejos: v = Ve^{jwt} e i = Ie^{jwt} , realizando derivadas parciales y sustituyendo; V e I son funciones de x.

$$\frac{-dV}{dx} = (R + j\omega L) * I \tag{2.11}$$

$$\frac{-dI}{dx} = (G + j\omega C) * V \tag{2.12}$$

Realizando una segunda derivada sobre (2.11) y (2.12) se obtiene:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = (R + j\omega L) * (G + j\omega C) * V \tag{2.13}$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = (R + j\omega L) * (G + j\omega C) * I \tag{2.14}$$

De (2.13) y (2.14) se obtiene (2.15):

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) * (G + j\omega C)} \tag{2.15}$$

que corresponde a la magnitud compleja del coeficiente de propagación,que se observa en la

Figura 2.12 para 100 metros del conductor de 25 mm^2 en función de la frecuencia. De igual forma se puede determinar la expresión (2.16), denominada impedancia característica de la línea de transmisión.La Figura 2.13, muestra la impedancia característica para 100 metros del conductor de 25 mm^2 en función de la frecuencia .

$$Zo = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{2.16}$$

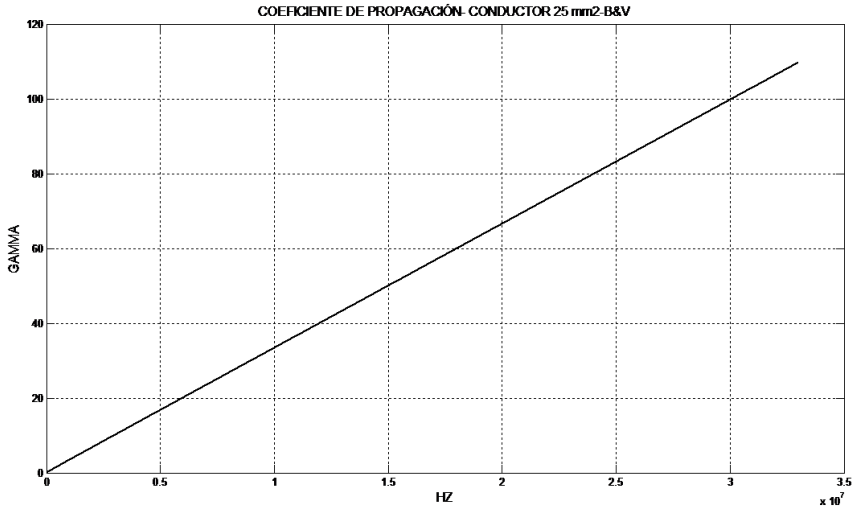


Figura 2.12: Coeficiente de propagación. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

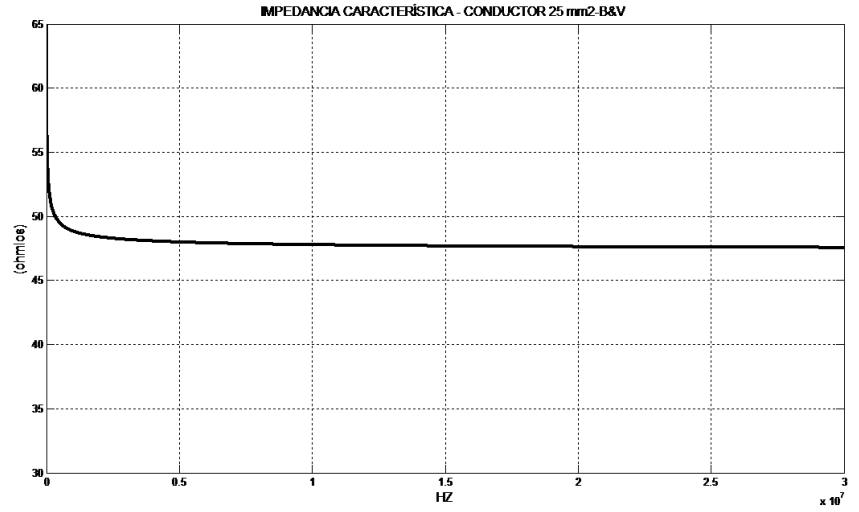


Figura 2.13: Impedancia característica. Conductor 25 mm^2
Fuente: el autor

El coeficiente e impedancia se hallaron con el **Programa # 3**(Ver Anexo de programas).

2.1.7. Consideraciones generales sobre funciones de transferencia y cálculo de filtros

Un sistema de transmisión consiste en una fuente, una carga, un circuito de acoplamiento o una etapa que cumple una determinada función ya sea amplificar, filtrar, de introducción de un ángulo de fase o de adaptación de impedancia.

Un sistema en este caso la topología monofásica se puede representar como un modelo de dos puertas (entrada / salida), donde las salidas corresponden a las tomas o cargas derivadas, Figura 2.14.

Se debe anotar que, cada vez que se relacione una variable (voltaje o corriente) de unos terminales respecto a una variable de terminales diferentes, se habla de funciones de transferencia ($\frac{V_2}{V_1}$; $\frac{I_2}{I_1}$).

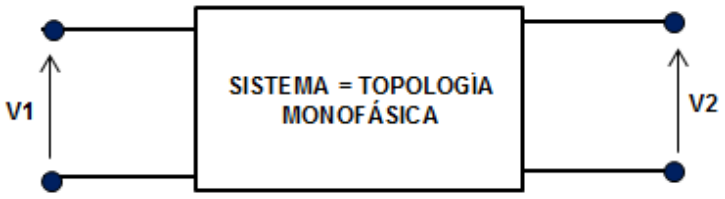


Figura 2.14: Modelo de dos puertas para un sistema
Fuente: el autor

La función de transferencia de voltajes para la topología monofásica de la Figura 2.14, se caracteriza por la frecuencia y se representa como aparece en (2.17).

$$|H(f)| = |H[\frac{V_2(f)}{V_1(f)}]| = |\frac{Variable\ de\ Salida(f)}{Variable\ de\ Entrada(f)}| = 20 * Log_{10}[\frac{V_2(f)}{V_1(f)}];\ dB \tag{2.17}$$

Si a la topología monofásica de la Figura 2.14,se le realiza una variación o una modificación y se desea conocer la nueva función de transferencia, se obtiene:

$$|H(f)_{nueva}| = |\frac{Variable\ de\ Salida(f)}{Variable\ de\ Entrada(f)}| = 20 * Log_{10}[\frac{V_{2nueva}(f)}{V_1(f)}];\ dB \tag{2.18}$$

Para determinar la variación de las funciones transferencia, se procede según (2.19):

$$\frac{H(f)_{nueva}}{H(f)} = K \tag{2.19}$$

Significa que la función de transferencia nueva experimenta un aumento de K decibelios, (2.20):

$$H(f)_{nueva} = K(dB) + H(f) \tag{2.20}$$

La topología monofásica internamente posee varias etapas o nodos, las funciones de transferencia se expresan según (2.21),siendo (j) el nodo de salida e (i) el nodo de entrada de un tramo de red:

$$|H(f)_{nodos(i,j)}| = 20 * Log_{10}[\frac{V_{nodo\ j}(f)}{V_{nodo\ i}(f)}] \tag{2.21}$$

Se verifica para (2.17),(2.18) y (2.20), que:

$$H(f) = \sum_{i=1}^{j}(H_i(f)) \ ; \ H(f)_{nueva} = \sum_{i=1}^{j}(H_{inuevos}(f)) \tag{2.22}$$

$$H(f)_{nueva} = K(dB) + \sum_{i=1}^{j}(H_i(f)) \tag{2.23}$$

Los voltajes varían en función de la frecuencia, la variación de potencia (DEP) que experimenta la topología monofásica antes y después de la modificación se muestra en (2.24), (2.25), (2.26) y (2.27).

$$DEP_{nodos(i,j)} = 10 * Log_{10}[\frac{V_{nodo\ j}(f)}{V_{nodo\ i}(f)}]^2 \tag{2.24}$$

$$DEP_{nodos(i,j)nueva} = 10 * Log_{10}[\frac{V_{nodo\ jnueno}(f)}{V_{nodo\ inuevo}(f)}]^2 \tag{2.25}$$

$$DEP = \sum_{i=1}^{j}(DEP_{nodos(i,j)}) \ ; \ DEP_{nueva} = \sum_{i=1}^{j}(DEP_{nodos(i,j)nueva}) \tag{2.26}$$

$$DEP_{nueva} = K1(dBm/Hz) + \sum_{i=1}^{j}(DEP_{nodos(i,j)}) \tag{2.27}$$

La función de transferencia, expresa la respuesta en frecuencia de un sistema y se utiliza entre otras aplicaciones, para determinar el tipo de filtro de un sistema o de una parte en particular del sistema.Generalmente algunos autores [17], utilizan para representar el dominio de la frecuencia a la letra "S", que corresponde a la frecuencia compleja, como aparece en (2.28).

$$|H(S)| = |\frac{Variable\ de\ Salida(S)}{Variable\ de\ Entrada(S)}| \tag{2.28}$$

Para mayor claridad en la observación y por facilidad en construcción, se utilizan los diagramas de Bode, cuya representación viene en magnitud y fase.

2.1.7.1. Filtro pasa bajo estándar

Consideremos la red básica que aparece en la Figura 2.15. Para determinar la tensión de salida V2(S), se utiliza un divisor de voltaje. La relación de tensiones se muestra en la ecuación (2.29).

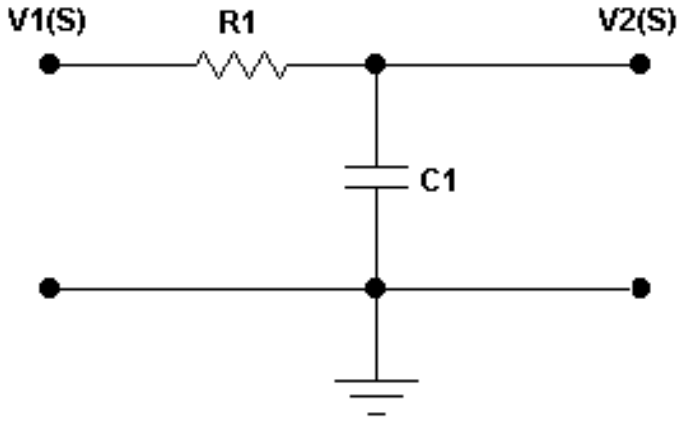


Figura 2.15: Modelo de dos puertas para una red pasa bajo
Fuente: [15],página 541

$$H(S) = \frac{V_2(S)}{V_1(S)} = \frac{\frac{1}{R1.C1}}{S + \frac{1}{R1.C1}} \tag{2.29}$$

En la función de transferencia el factor 1 / R1*C1, corresponde: en el numerador a una asíntota horizontal de valor constante que parte del eje de amplitud (dB) y en el denominador a una

asíntota de -20 dB/dec que parte de punto de corte 1 / R1*C1 en el eje de frecuencia (Hz). El ángulo tiene una variación de - 45 grados/dec. El término dec = década o factor de aumento por 10 entre frecuencias.

El término estándar o normalizado, se refiere a los valores de las pendientes de las asíntotas:

• Los factores de la forma $(S + K)^n$ en el denominador, tienen pendientes negativas en múltiplos de -20 dB/dec, así: n=1 atenuación= -20 dB/dec, n=2 atenuación= -40 dB/dec, n=3 atenuación= -60 dB/dec, etc.

• Para la variación de ángulos se tiene: n=1 variación de fase=-45 grados/dec, n=2 variación de fase=-90 grados/dec, n=3 variación de fase=-135 grados/dec.

• Como referencia de cero, se toma la asíntota horizontal de ± 3dB, que corta con la asíntota vertical de la frecuencia de corte.

Como ejemplo considere para la red de la Figura 2.15 :

• R1= 100KΩ y C1= 100 μF; R1*C1= 10; 1 / R1*C1= 0.10

• Utilizando MATLAB, se observa: punto de corte (0.10) a -3 dB, variación en magnitud (-20 dB/dec) y variación en fase (-45 grados/dec). Ver Figura 2.16.

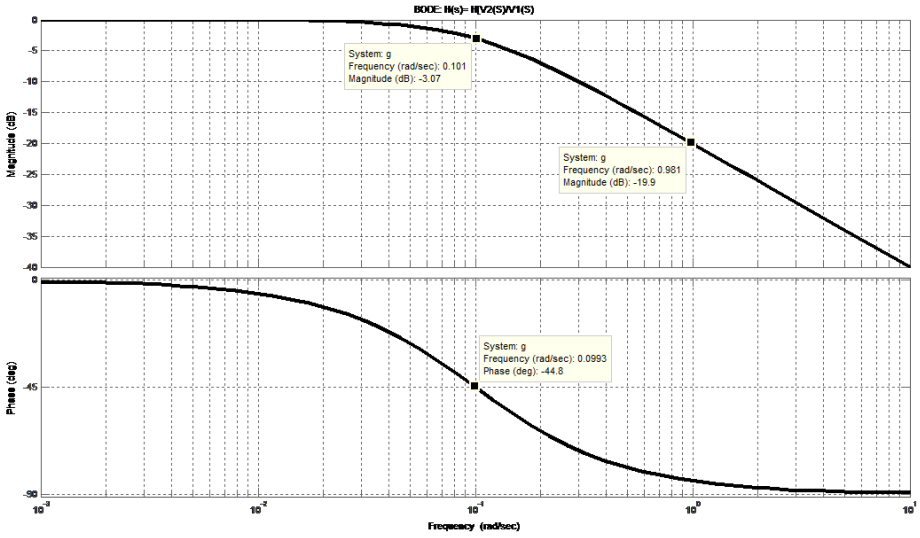


Figura 2.16: Diagrama de Bode. Magnitud y fase, filtro pasa-bajo del ejemplo
Fuente: el autor

2.1.7.2. Filtro pasa alto estándar

Consideremos la red básica que aparece en la Figura 2.17. Para determinar la tensión de salida V2(S), se utiliza un divisor de voltaje. La relación de tensiones se muestra en la ecuación (2.30).

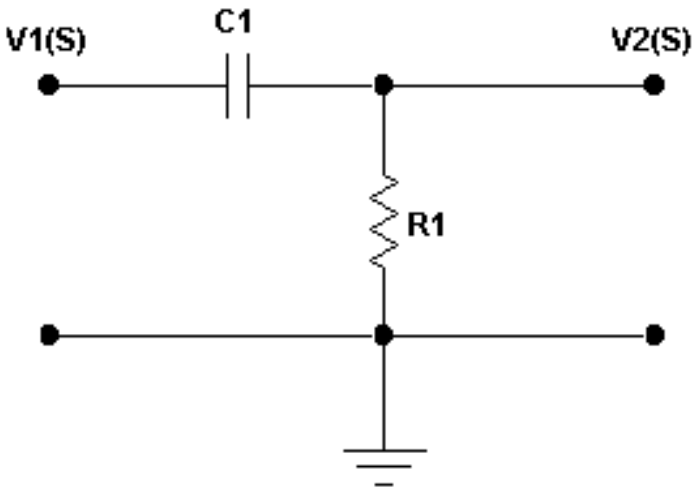


Figura 2.17: Modelo de dos puertas para una red pasa alto
Fuente: [15],página 542

$$H(S) = \frac{V_2(S)}{V_1(S)} = \frac{S}{S + \frac{1}{R1.C1}} \tag{2.30}$$

En la función de transferencia el factor 1 / R1*C1, en el denominador es una asíntota de -20 dB/dec que parte de punto de corte 1 / R1*C1 en el eje de frecuencia (Hz), el numerador tiene una asíntota de +20 dB/dec con punto de corte en cero. La suma de asíntotas en 1 / R1*C1, es igual a cero. El ángulo tiene una variación de -45 grados/dec.

Siguiendo con el ejemplo considere para la red de Figura 2.17 :

• R1= 100 KΩ y C1= 100 μ F; R1*C1= 10; 1 / R1*C1= 0.10

• Utilizando MATLAB, se observa: punto de corte (0.10) a - 3dB, variación en amplitud (20 dB/dec) y variación en fase (-45 grados/dec). Ver Figura 2.18.

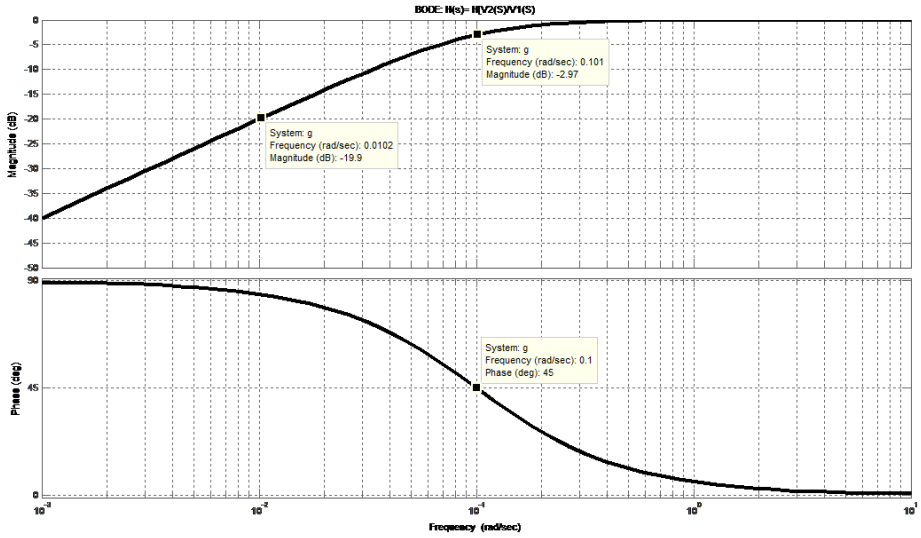


Figura 2.18: Diagrama de Bode. Magnitud y fase filtro pasa-alto del ejemplo
Fuente: el autor

2.1.7.3. Filtro pasa banda estándar

Consideremos la red básica de la Figura 2.19. Se puede observar que la componen dos redes básicas: una red pasa alto a la entrada y una red pasa bajo a la salida.

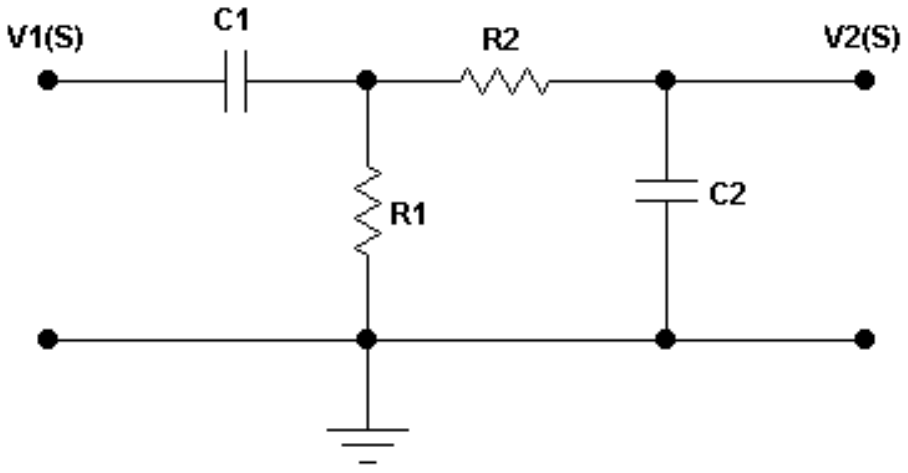


Figura 2.19: Modelo de dos puertas para una red pasa banda
Fuente: [15],página 543

La tensión de salida V2(S), se halla con divisores de voltaje. Los valores considerados para un ejemplo aparecen en la Figura 2.20 y la relación de tensiones se muestra en la ecuación (2.31).

R1=	10000	Ω	=	10 KΩ
R2=	100000	Ω	=	100 KΩ
C1=	1,00E-05	F	=	10 µ F
C2=	1,00E-04	F	=	100 µ F

R1*C1=K1= 1,00E-01	R1*R2=K8= 1,00E+09
R1*C2=K2= 1,00E+00	C2^2 = K9 = 1,00E-08
R2*C1=K3= 1,00E+00	K8*K9= K10 = 1,00E+01
R2*C2=K4= 1,00E+01	K4^2= K11 = 1,00E+02
R2^2 = K5 = 1,00E+10	2K7+K10+K11=K12= 1,12E+02
K1*K4^2= K6 = 1,00E+01	K1+K2+2*K4=K13= 2,11E+01
K1*K4= K7 = 1,00E+00	

Figura 2.20: Valores considerados para el ejemplo, red pasa banda
Fuente: el autor

$$H(S) = \frac{V_2(S)}{V_1(S)} = \frac{(K1 * K4) * S^2 + K1 * S}{(K1 * K4^2) * S^3 + K12 * S^2 + K13 * S + 1} \tag{2.31}$$

Puntos de corte a -3 dB,en K1= R1*C1 = 0.1 y K4=R2*C2 = 10, establecen el ancho de banda aprox. de 10 Hz. Existen tres asíntotas: una asíntota de +20 dB/dec [corte en R1*C1], 0 dB [determina el ancho de banda] y de -20 dB/dec [corte en R2*C2]. Existen dos variaciones de ángulos una de +45 grados/dec en R1*C1 y otra de - 45 grados/dec en R2*C2. Con MATLAB, se obtiene la Figura 2.21. con los valores característicos del pasa alto y pasa bajo.

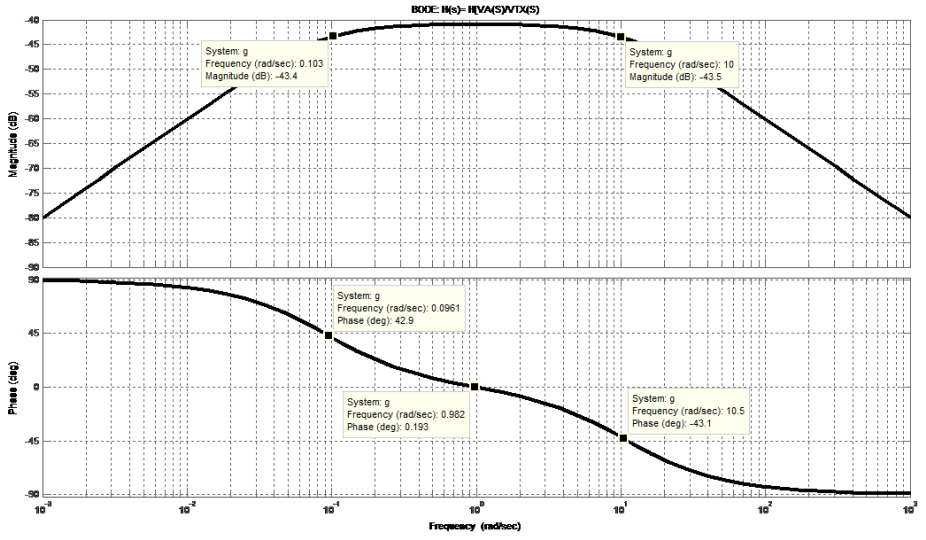


Figura 2.21: Diagrama de Bode. Magnitud y fase filtro pasa-banda del ejemplo
Fuente: el autor

2.1.8. Síntesis de redes

El **Análisis de Redes** eléctricas y electrónicas se presenta cuando la red y la excitación se dan para encontrar la respuesta sobre las variables relacionadas. El mecanismo de **Síntesis de Redes** eléctricas y electrónicas, se presenta cuando la excitación y las respuestas de la red se dan y se requiere encontrar la red [8], este procedimiento se puede asimilar a un procedimiento de **Ingeniería Inversa en Redes**.

Con la síntesis de redes, se procura construir o diseñar redes que satisfacen las características de la excitación (en voltaje y/o frecuencia) o que cumplan con determinadas respuestas.

La síntesis de redes que se aplica en este trabajo es: pasiva y lineal, porque trabaja con elementos concentrados, lineales, finitos, pasivos y bilaterales, caracterizados por funciones reales positivas.

2.1.8.1. Funciones reales positivas

La admitancia o la impedancia de terminales para redes construidas con elementos concentrados, lineales, finitos, pasivos y bilaterales, tienen la forma de cociente racional de polinomios en el dominio de la frecuencia compleja "S" y se expresan como aparece en la ecuación (2.32).

$$H(S) = \frac{a_0.S^n + a_1.S^{n-1} + ... + a_{n-1}.S + a_n}{b_0.S^n + b_1.S^{n-1} + ... + b_{n-1}.S + b_n} \tag{2.32}$$

Los requerimientos que ofrecen criterios para determinar si una función resultante de una aproximación o de una iteración propuesta,es real positiva, fueron presentadas por Otto Brune en 1931, estableció la posibilidad de realizar una red pasiva en términos de funciones reales y positivas, si satisfacen las condiciones (2.33).

$$Re[Y(S)] \geq 0; Re[Z(S)] \geq 0 \tag{2.33}$$

En (2.33) se observa la primera propiedad, que si una función es real positiva, su recíproco

también lo es. La segunda propiedad es, que el grado del numerador, no puede diferir en más de uno al grado del denominador, en consecuencia los términos de más bajo grado de los polinomios del numerador y denominador de una función real positiva, difieren en grado a lo sumo en uno.

La tercera propiedad, es que los polos sobre el eje imaginario deben ser simples y sus residuos reales y positivos. En este estudio se utilizan los Modelos Cawer I y II, que cumplen los criterios de funciones reales positivas y su desarrollo en escalera produce una función real positiva en cada paso (2.34),los residuos [hi] corresponden a una resistencia o a un condensador.

$$H(S) = \frac{P(S)}{Q(S)} = h1 + \frac{1}{h2 + \frac{1}{h3 + \frac{1}{h4 + \frac{1}{h5....}}}} \tag{2.34}$$

2.1.8.2. Modelos Cawer 1 y Cawer 2

- Modelo de síntesis de redes Primera forma de Cawer, son extracciones alternadas de constante y polo en infinito, la constante removida en infinito se toma como impedancia [Z] porque Re[Z_{RC}] (función real positiva) es una función monótona decreciente en [ω] y los polos en el infinito se remueven de la admitancia restante [Y] de forma alternada, la función de transferencia Z_{RC}, se plantea como impedancia. La red se presenta en forma de escalera con resistencias en serie y condensadores en derivación.

La relación (2.35), muestra la función de transferencia del **Modelo Cawer 1**, utilizado para este estudio.El tipo de filtro asociado a esta función de transferencia, corresponde a un pasabajo de orden 2, las constantes se deben escoger con la condición que: $b_i > a_i$, utilizando iteracines sucesivas mediante métodos numéricos [18].

$$H(S) = \frac{a_2 * S^2 + a_1 * S + a_0}{b_2 * S^2 + b_1 * S^2 + b_0} \tag{2.35}$$

-Modelo de síntesis de redes Segunda forma de Cawer, donde las constantes en frecuencia cero

son removidas como admitancias [Y] y los polos en el origen se remueven de la impedancia restante [Z] en forma alternada, la función de transferencia Y_{RC}, debe estar planteada como admitancia porque Re[Y_{RC}] (función real positiva) es una función monótona creciente en [ω]. La red se presenta en forma de escalera con condensadores en serie y resistencias en derivación.

La relación (2.36), muestra la función de transferencia del **Modelo Cawer 2**, utilizado para este estudio.El tipo de filtro asociado a esta función de transferencia, corresponde a un pasa-alto de orden 2, las constantes se deben escoger con la condición que: $a_i > b_i$, utilizando iteracines sucesivas mediante métodos numéricos [18].

$$H(S) = \frac{a_0 + a_1 * S + a_2 * S^2}{b_0 + b_1 * S + b_2 * S^2} \tag{2.36}$$

Capítulo 3

Metodología para el desarrollo de la investigación

El desarrollo de la investigación, se enmarca dentro del método Hipotético-Deductivo, cuya hipótesis y verificación se describen a continuación.

3.1. Uso del método Hipotético-Deductivo

El algoritmo utilizado demostró que mediante la técnica de ***síntesis de redes***, es posible reproducir la función de transferencia del canal. Para explicar el comportamiento, se propuso como **hipótesis**,que utilizando técnicas de síntesis de redes eléctricas, para obtener filtros pasivos, es posible reproducir el comportamiento de la función de transferencia del canal de señales de comunicación, en una topología monofásica modelada en líneas de transmisión. Los filtros pasivos son redes caracterizadas en parámetros concentrados y su comportamiento y operación es similar a las líneas de transmisión, que son redes caracterizadas en parámetros distribuidos.

Las cargas derivadas de los nodos en la topología monofásica modelada en líneas de transmisión, la conforman la impedancia característica de línea y su conexión establece los canales de comunicación. Para comprobar la operación del filtro asociado al canal que establece la carga derivada, se reemplaza ésta por la impedancia del filtro y se opera a frecuencias entre 1.8 MHz y 30 MHz, que corresponde al ancho de banda de un sistema con tecnología BPL. Se verifica el comportamiento con la desviación estándar, entre: funciones de transferencia, DEP, relación

señal a ruido, capacidad de canal y transferencia máxima de potencia, en la carga con y sin el filtro. Los resultados obtenidos, demuestran que es consistente utilizar como canal, el modelo en parámetros concentrados de la impedancia del filtro, porque su comportamiento es similar al canal analizado en el modelo de parámetros distribuidos.

En este trabajo los análisis utilizados en la metodología, se validan asimilando los calibres nominados como A (10 mm^2) y B (25 mm^2) [1] que se clasifican en la Tabla 2.2. Los elementos que conducen al diseño del método, se describen así:

Fase 1: Determinar los valores de parámetros eléctricos para los conductores validados A (10 mm^2) y B (25 mm^2), utilizando las expresiones (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8).

Fase 2: A partir de la geometría y configuración de la topología monofásica propuesta en la Figura 2.3 y su representación en líneas de transmisión Figuras 2.4 , se hallan los parámetros aplicando relaciones electromagnéticas [12], [13], [19] y se modela en parámetros distribuidos. La condición de operación: Carga igual a la impedancia característica, modelo de línea infinita, sin reflexión de energía de la carga hacia la fuente, toda la potencia se absorbe en la carga [transferencia máxima de potencia].

Fase 3: Cada elemento del modelo de línea de transmisión, se ubica dentro del modelo de dos puertas [2], [20] y se caracteriza como una matriz hiperbólica 2X2 [A, B, C, D] [21], [22], [23] donde cada coeficiente caracteriza relaciones electromagnéticas inherentes a la línea de transmisión [13]. Posteriormente por la configuración de la topología monofásica (red en paralelo) se realiza la transformación en parámetros Y de admitancia o cortocircuito.

Fase 4: Actuando sobre las matrices de transmisión y admitancia, se controla la variación en frecuencia y longitud sobre el modelo de línea de transmisión. Se energiza la red con una fuente variable en frecuencia y se obtienen sistemas de ecuaciones,de los que se extraen las funciones de transferencia del canal que establece cada carga derivada de la red monofásica [operación realizada para redes de 3 y 5 nodos] y la representación del posible filtro asociado al canal [24], como muestra la Figura 3.1.

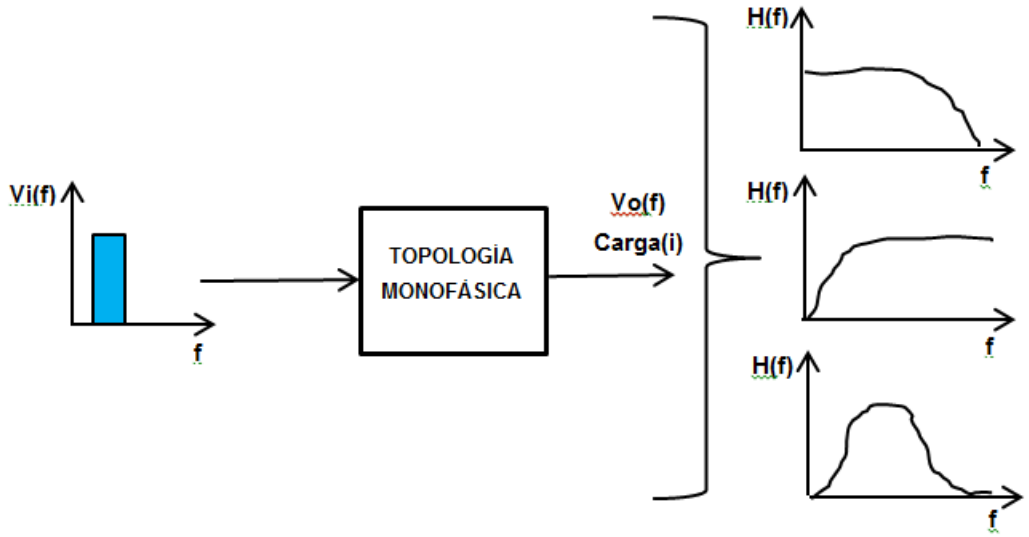


Figura 3.1: Representación entrada y salida en la topología monofásica
Fuente: el autor

Fase 5: Previo en aplicar la técnica de síntesis de redes, es necesario comparar el resultado de la función de transferencia del canal, con la representación de un Diagrama de Bode que posea las mismas características [ancho de banda, punto de corte a - 3 dB y pendiente de la asíntota a 40 dB/década]. La ecuación (3.1), muestra el modelo utilizado para determinar el diagrama de Bode.Se observa en (3.1), que los polinomios están en el dominio de la frecuencia compleja y la razón de escoger polinomios de grado 2, obedece a que cada grado de aumento en los polinomios equivale a conectar un lazo adicional RC en la red final.

$$H(S) = \frac{a_2 * S^2 + a_1 * S + a_0}{b_2 * S^2 + b_1 * S^2 + b_0} \tag{3.1}$$

Donde:

-Los valores de las constantes, a_2 y b_2, controlan la amplitud del diagrama de Bode.

- Se escoge como norma de diseño, que b_1=$2 * a_1$.Con esta recurrencia, se puede controlar finamente amplitud y frecuencia.

-Los valores de las constantes, a_0 y b_0, controlan la frecuencia de corte del diagrama de Bode.

Asimilado el diagrama de Bode, se toman las constantes de los polinomios del numerador y denominador,para probar que estos polinomios son factorizables [modelo de Newton -Raphson]. Los polinomios obtenidos,se introducen en un algoritmo que desarrolla la técnica de síntesis de

redes [Modelos Cawer I y/o Cawer II] y permite determinar los valores de los elementos de la red correspondiente al Filtro asociado al canal.

Fase 6: Encontrado el tipo de filtro, en el canal que establece la carga derivada más alejada de la fuente BPL [mayor canal], se reemplaza ésta por el filtro (pasa-bajo, pasa-alto ó pasa-banda) y se verifica si se presentan respuestas similares en cuanto a: función de transferencia del canal,DEP de Señal, Relación Señal a Ruido y capacidad de canal [9], para diferentes potencias de transmisión. Con lo anterior se podría inferir que una red en parámetros concentrados [Filtro], puede recrear el comportamiento de la función de transferencia y serviría como un modelo computacional para simular un canal BPL. En la Figura 3.2 se muestran los eventos.

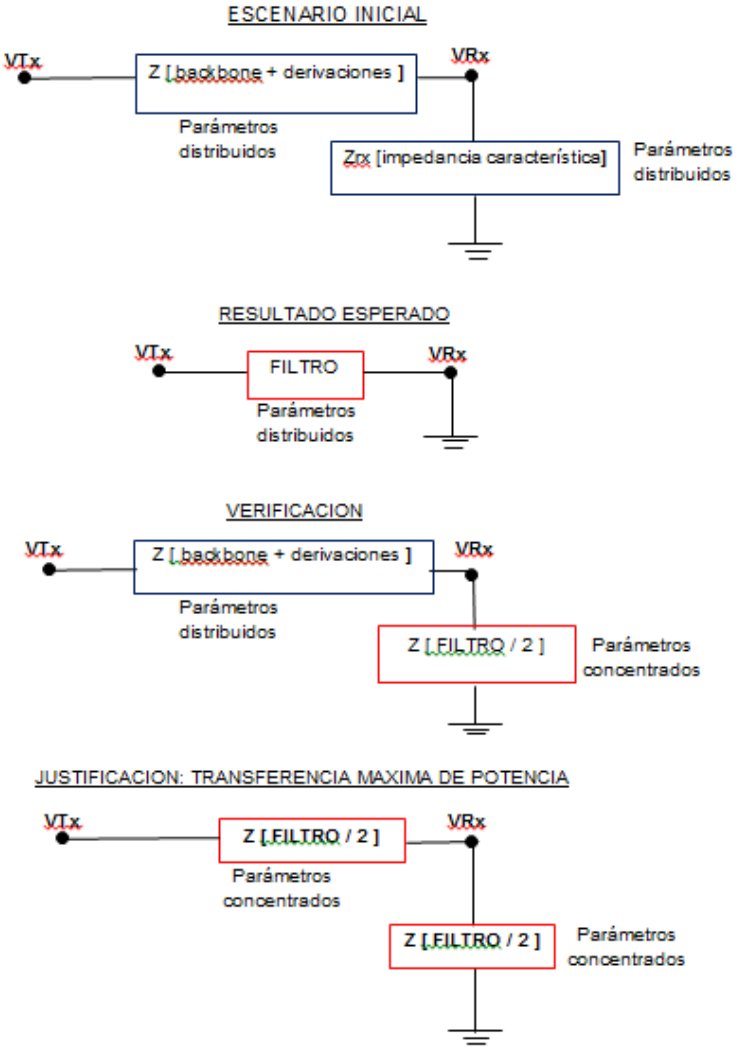


Figura 3.2: Eventos esperados si se presenta un Filtro en el canal de una carga derivada
Fuente: el autor

3.2. Diseńo de la propuesta

Los resultados preliminares sobre cada tramo de la topología monofásica y sobre secciones características, para los calibres nominados como A (10 mm^2) y B (25 mm^2) que se clasifican en la Tabla 2.2, se obtienen simulando el diseńo del algoritmo propuesto (Capítulo 5) en la versión de MATLAB 7.10.0.499-R2010a [25], para implementar la metodología. En cada simulación se utilizan 300 iteraciones y se controla: distancia de tramos, características de conductores, parámetros de las líneas de transmisión, impedancias características, funciones de transferencia, DEP de Señal y Ruido, Capacidad de Canal, con y sin el Filtro estimado; variando frecuencia entre 1.8 MHz y 30 MHz y la longitud entre 1,0 metros y 50 metros. La DEP de transmisión se ajustó entre -52 dBm/Hz y -60 dBm/Hz.

3.3. Características del conductor utilizado

Los conductores utilizados en este estudio para la topología monofásica Figura 2.3 de una vivienda estándar considerada (apartamento), son los calibres nominados como A (10 mm^2) en derivaciones y B (25 mm^2) para el backbone. En la Tabla [3.1] aparecen sus características.

Tabla 3.1: Características de los conductores utilizados.

Conductor	r $[\mu\Omega.m^{-1}]$	l1 $[\mu H.m^{-1}]$	l2 $[\mu H.m^{-1}.s{-}1/2]$	g $[pS.m^{-1}.s]$	c $[pF.m^{-1}]$
$10mm^2$	142	0.287	22.3	4.68	91
$25mm^2$	79.1	0.248	16.8	8.57	111

Fuente: Bostoen y Van de Wiel, [1]

3.4. Longitud de tramos y obtención de parámetros

Para la vivienda estándar, las distancias por circuito instalado o tramos de red considerados se muestran en la Tabla [3.2]. En las Tablas [3.3] a [3.6] aparecen los valores calculados de los parámetros para cada tramo de red, en las Figuras 3.3. y 3.4 la impedancia total y la corriente total de la topología.

Tabla 3.2: Longitud tramos en la red considerados (m).

Tramo # 1	Tramo # 2	Tramo # 3	Tramo # 4	Tramo # 5	Tramo # 6	Tramo # 7
21.2280	18.3370	20.5615	22.3270	21.2160	17.1170	21.1605

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.3: Resistencia para cada tramo de red en $\mu\Omega$.

Tramo # 1	Tramo # 2	Tramo # 3	Tramo # 4	Tramo # 5	Tramo # 6	Tramo # 7
0.0019	0.0032	0.0019	0.0036	0.0019	0.0033	0.0023

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.4: Inductancia para cada tramo de red en μH.

Tramo # 1	Tramo # 2	Tramo # 3	Tramo # 4	Tramo # 5	Tramo # 6	Tramo # 7
413	504.50	401.70	572.10	412.80	522.10	497.10

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.5: Pérdidas de capacidad para cada tramo de red en (pF).

Tramo # 1	Tramo # 2	Tramo # 3	Tramo # 4	Tramo # 5	Tramo # 6	Tramo # 7
2689	2033	2615	2305	2688	2104	3237

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.6: Conductancia para cada tramo de red en (pS).

Tramo # 1	Tramo # 2	Tramo # 3	Tramo # 4	Tramo # 5	Tramo # 6	Tramo # 7
2076	1045	2019	1185	2075	1082	2499

Fuente: elaboración propia

Los valores de parámetros de la línea de transmisión se hallaron con el **Programa # 2**. El cálculo de la impedancia y corriente total,se realizó mediante el **Programa # 4** (Ver Anexo de programas).

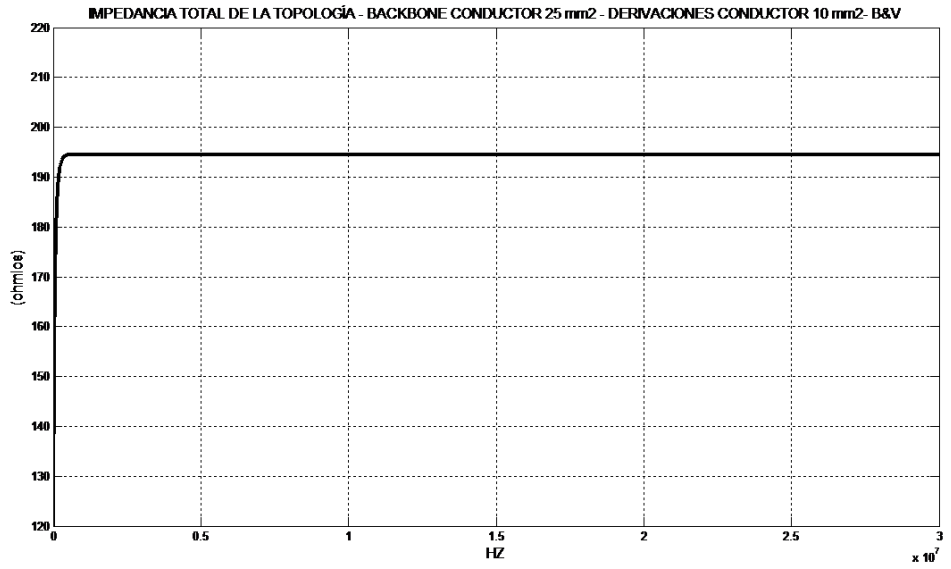


Figura 3.3: Impedancia total de la topología. Conductores: 10 mm^2 en derivaciones y 25 mm^2 en el backbone.

Fuente: el autor

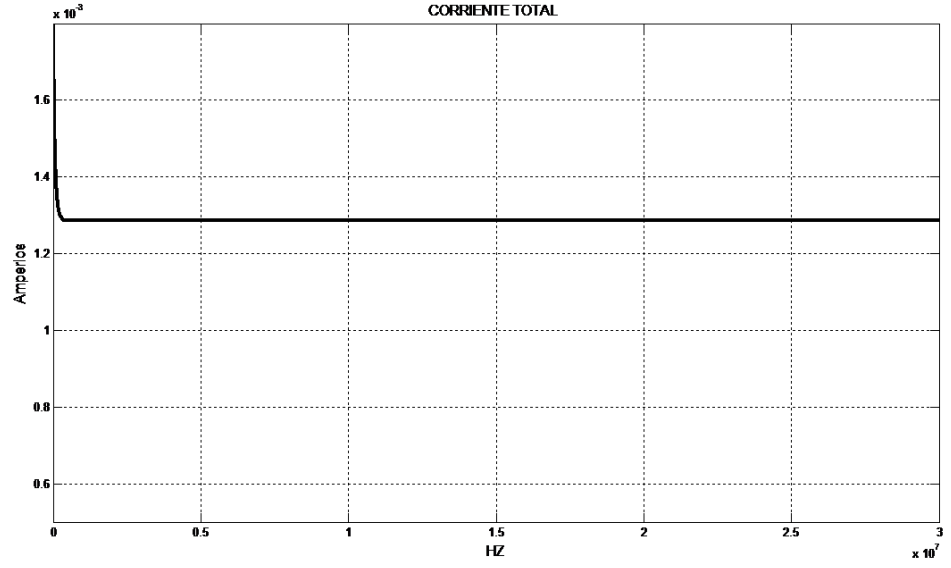


Figura 3.4: Corriente total de la topología. Conductores: 10 mm^2 en derivaciones y 25 mm^2 en el backbone.

Fuente: el autor

Capítulo 4

Desarrollos teóricos propios [Aportes]

En este capítulo se obtiene como producto del trabajo, un conjunto de modelos teóricos necesarios para interpretar y desarrollar el análisis de sistemas de líneas de transmisión, a partir de modelos teóricos universalmente conocidos.

4.1. Soluciones hiperbólicas

Una forma de expresar las soluciones a las ecuaciones de línea (2.11) y (2.12), de utilidad para problemas numéricos es utilizar funciones hiperbólicas [26] en función de la longitud (x) de la línea y la frecuencia ω.
Así, se tiene:

$$V(\gamma\omega x) = m * e^{-\gamma\omega x} + n * e^{\gamma\omega x} \tag{4.1}$$

$$I(\gamma\omega x) = \frac{m}{Z_o} * e^{-\gamma\omega x} - \frac{n}{Z_o} * e^{\gamma\omega x} \tag{4.2}$$

Tomando un tramo de la **Figura 2.4** para definir condiciones iniciales, se utiliza la **Figura 4.1** donde Vs, Is, Vr, Ir son las tensiones y corrientes de los extremos de salida y llegada respectivamente de la línea de transmisión.

Condiciones iniciales:

Para x=0, V=Vs e I=Is, reemplazando en (4.1) y (4.2) se obtiene,



Figura 4.1: Tramo de línea de transmisión
Fuente: el autor

$$V(0) = V_s = m + n \tag{4.3}$$

$$I(0) = I_s = \frac{m}{Z_o} - \frac{n}{Z_o} \tag{4.4}$$

Donde:

$$m = \frac{V_s + I_s.Z_o}{2}; n = \frac{V_s - I_s.Z_o}{2} \tag{4.5}$$

Sustituyendo (4.5) en (4.3) y (4.4), se obtiene (4.6) y (4.7):

$$V(\gamma\omega x) = e^{-\gamma\omega x}.[\frac{V_s + I_s.Z_o}{2}] + e^{\gamma\omega x}.[\frac{V_s - I_s.Z_o}{2}] \tag{4.6}$$

$$I(\gamma\omega x) = e^{-\gamma\omega x}.[\frac{V_s + I_s.Z_o}{2}] - e^{\gamma\omega x}.[\frac{V_s - I_s.Z_o}{2}] \tag{4.7}$$

Como:

$$Cosh(\gamma\omega x) = \frac{e^{\gamma\omega x} + e^{-\gamma\omega x}}{2}; Senh(\gamma\omega x) = \frac{e^{\gamma\omega x} - e^{-\gamma\omega x}}{2} \tag{4.8}$$

Se obtiene reemplazando (4.8) en (4.6) y (4.7) finalmente,

$$I(\gamma\omega x) = I_s.Cosh(\gamma\omega x) - [\frac{V_s}{Z_o}].Senh(\gamma\omega x) \tag{4.9}$$

$$V(\gamma\omega x) = V_s.Cosh(\gamma\omega x) - [I_s.Z_o].Senh(\gamma\omega x) \tag{4.10}$$

Expresar (4.9) y (4.10) en forma matricial como un modelo de dos puertas conduce a (4.11):

$$\begin{bmatrix} V(\gamma\omega x) \\ I(\gamma\omega x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cosh(\gamma\omega x) & Z_o.Senh(\gamma\omega x) \\ \frac{Senh(\gamma\omega x)}{Z_o} & Cosh(\gamma\omega x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

La matriz del sistema **(4.11)** se denomina **Matriz de Transmisión (4.12)** y para fines

operativos se le asocia una matriz de coeficientes como aparece en **(4.13)**.

$$\begin{bmatrix} A(\gamma\omega x) & B(\gamma\omega x) \\ C(\gamma\omega x) & D(\gamma\omega x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cosh(\gamma\omega x) & Z_o.Senh(\gamma\omega x) \\ \frac{Senh(\gamma\omega x)}{Z_o} & Cosh(\gamma\omega x) \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

$$\begin{bmatrix} A(\gamma\omega x) & B(\gamma\omega x) \\ C(\gamma\omega x) & D(\gamma\omega x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

La energía del sistema eléctrico en una vivienda se distribuye en topologías tipo bus (en paralelo) con diferente impedancia característica, la intensidad de corriente adquiere valores diferentes para un determinado tiempo, por esta razón al canal se aplica el modelo de Parámetros Distribuidos y es necesario transformar los parámetros de la Matriz de Transmisión [aij] **(4.13)**, en el modelo π [Yij] de la Figura 4.2, para obtener **(4.14)**.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{22}}{a_{12}} & \frac{-\Delta_a}{a_{12}} \\ \frac{-1}{a_{12}} & \frac{a_{11}}{a_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A(\gamma\omega x)}{B(\gamma\omega x)} & \frac{-1}{B(\gamma\omega x)} \\ \frac{-1}{B(\gamma\omega x)} & \frac{A(\gamma\omega x)}{B(\gamma\omega x)} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

La red π recíproca obtenida de los parámetros de admitancia **(4.14)**, se muestra en la Figura 4.2, que se denomina red π general [15], [20] y se utiliza para representar cada tramo de línea de transmisión del alimentador (backbone) [A-B];[B-C];[C-D];[D-E] de la topología monofásica Figura 2.4. Primer paso para hallar el sistema de ecuaciones de la red y las tensiones de nodo.

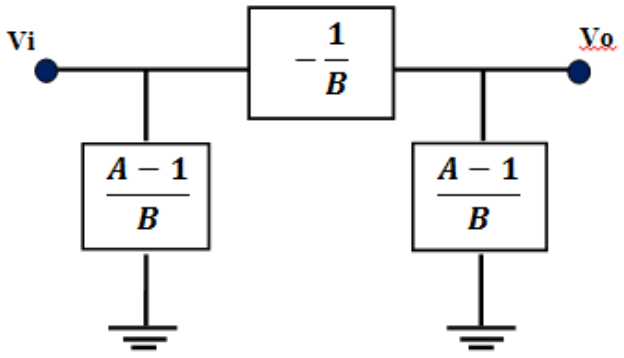


Figura 4.2: Red π recíproca para un tramo del alimentador
Fuente: el autor

4.1.1. Consideraciones para cargas derivadas

Las cargas derivadas corresponden según la **Figura 2.4** a los tramos [B-ZL1]; [C-ZL2]; [D-ZL3]; [E-ZL4], donde ZL1,ZL2,ZL3 y ZL4, en este estudio se consideran como la impedancia característica.

Este tipo de línea de transmisión se denomina línea con cualquier terminación y tiene una impedancia de terminación Z_R como muestra la Figura 4.3. Es necesario evaluar a Z_R vista desde el alimentador, es decir, desde la impedancia de entrada Zs.

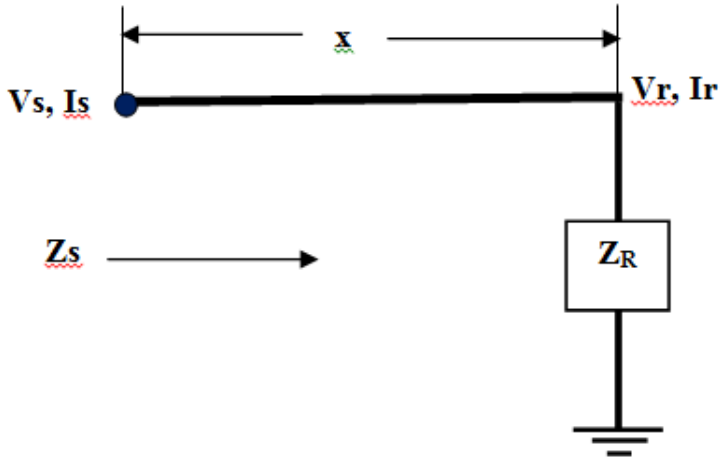


Figura 4.3: Tramo de línea de transmisión para una carga derivada
Fuente: el autor

De la anterior figura, se obtiene:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s}; Z_R = \frac{V_r}{I_r} \tag{4.15}$$

Para una distancia x, se obtiene de (4.9) y (4.10):

$$I_R(\gamma\omega x) = I_s * Cosh(\gamma\omega x) - [\frac{V_s}{Z_o}] * Senh(\gamma\omega x) \tag{4.16}$$

$$V_R(\gamma\omega x) = V_s * Cosh(\gamma\omega x) - [I_s * Z_o].Senh(\gamma\omega x) \tag{4.17}$$

De las ecuaciones (4.15), (4.16) y (4.17) se obtiene (4.18):

$$Z_R(\gamma\omega x) = \frac{V_R}{I_R} = Z_o * [\frac{V_s * Cosh(\gamma\omega x) - [I_s * Z_o] * Senh(\gamma\omega x)}{I_s * Cosh(\gamma\omega x) - [\frac{V_s}{Z_o}] * Senh(\gamma\omega x)}] \tag{4.18}$$

Despejando Vs de (4.18), se obtiene (4.19):

$$Z_s(\gamma\omega x) = \frac{V_s}{I_s} = Z_o * [\frac{Z_R * Cosh(\gamma\omega x) + Z_o * Senh(\gamma\omega x)}{Z_o * Cosh(\gamma\omega x) + Z_R * Senh(\gamma\omega x)}] \tag{4.19}$$

La relaciones (4.18) y (4.19) se pueden expresar en función de los coeficientes A, B, C y D obtenidos de (4.13), así:

$$Z_R(\gamma\omega x) = \frac{Z_s * A(\gamma\omega x) - B(\gamma\omega x)}{A(\gamma\omega x) - Z_s * C(\gamma\omega x)} \tag{4.20}$$

$$Z_s(\gamma\omega x) = \frac{Z_R * A(\gamma\omega x) + B(\gamma\omega x)}{D(\gamma\omega x) + Z_R * C(\gamma\omega x)} \tag{4.21}$$

La relación (4.21) es la impedancia de entrada o reflejada **Zs** que ve el alimentador desde la carga Z_R como línea de transmisión. Como el modelo se expresa en admitancias, la admitancia de entrada o reflejada **Ys**, se muestra en (4.22).

$$Y_s(\gamma\omega x) = \frac{Z_R * C(\gamma\omega x) + D(\gamma\omega x)}{B(\gamma\omega x) + Z_R * A(\gamma\omega x)} \tag{4.22}$$

La red π recíproca obtenida de los parámetros de admitancia **(4.14)**, aparece en la Figura 4.4.

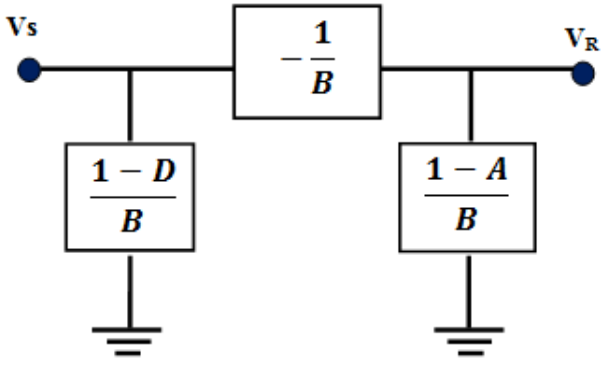


Figura 4.4: Red π recíproca para cargas derivadas
Fuente: el autor

4.2. Representación en líneas de transmisión y solución de la topología monofásica

Agotados los procedimientos de cálculo, análisis y modelado de todos los elementos, tramos y la topología monofásica en general, se procede a representar la topología en parámetros distribuidos modelo de admitancias y encontrar el sistema de ecuaciones asociado [21], [27].

Para este fin se recurre a los modelos obtenidos en las Figuras 4.2 y 4.4 donde se resume la representación en líneas de transmisión de la **Figura 2.4** para el alimentador (backbone) y las cargas derivadas.

Como la topología monofásica es en esencia una red en paralelo, para la solución de las tensiones de nodo, se utiliza el modelo de **Kirchhoff** suma de corrientes en un nodo igual a cero ecuación (4.23), [15] y todos los elementos en impedancias, como se aprecia en la Figura 4.5 siendo $V_{0,k}$ la tensión en el nodo k, $V_{i,k}$ son las tensiones de los N nodos adyacentes al nodo k conectados por las N líneas de transmisión conectadas al nodo k; B_i y A_i son los elementos de la matriz de transmisión de la línea que conecta el nodo k con el nodo i.

$$V_{0,k}.\sum_{i=1}^{N}(\frac{A_i}{B_i}) - \sum_{i=1}^{N}(\frac{V_{0,k}}{B_i}) = 0 \tag{4.23}$$

Operando sobre las corrientes para cada nodo de la Figura 4.5 y aplicando (4.23) se obtiene el conjunto de ecuaciones 4.24 a 4.33, que forman el sistema simétrico ampliado (4.34), de donde se determinaran las funciones de transferencia para puntos de interés de la topología monofásica.

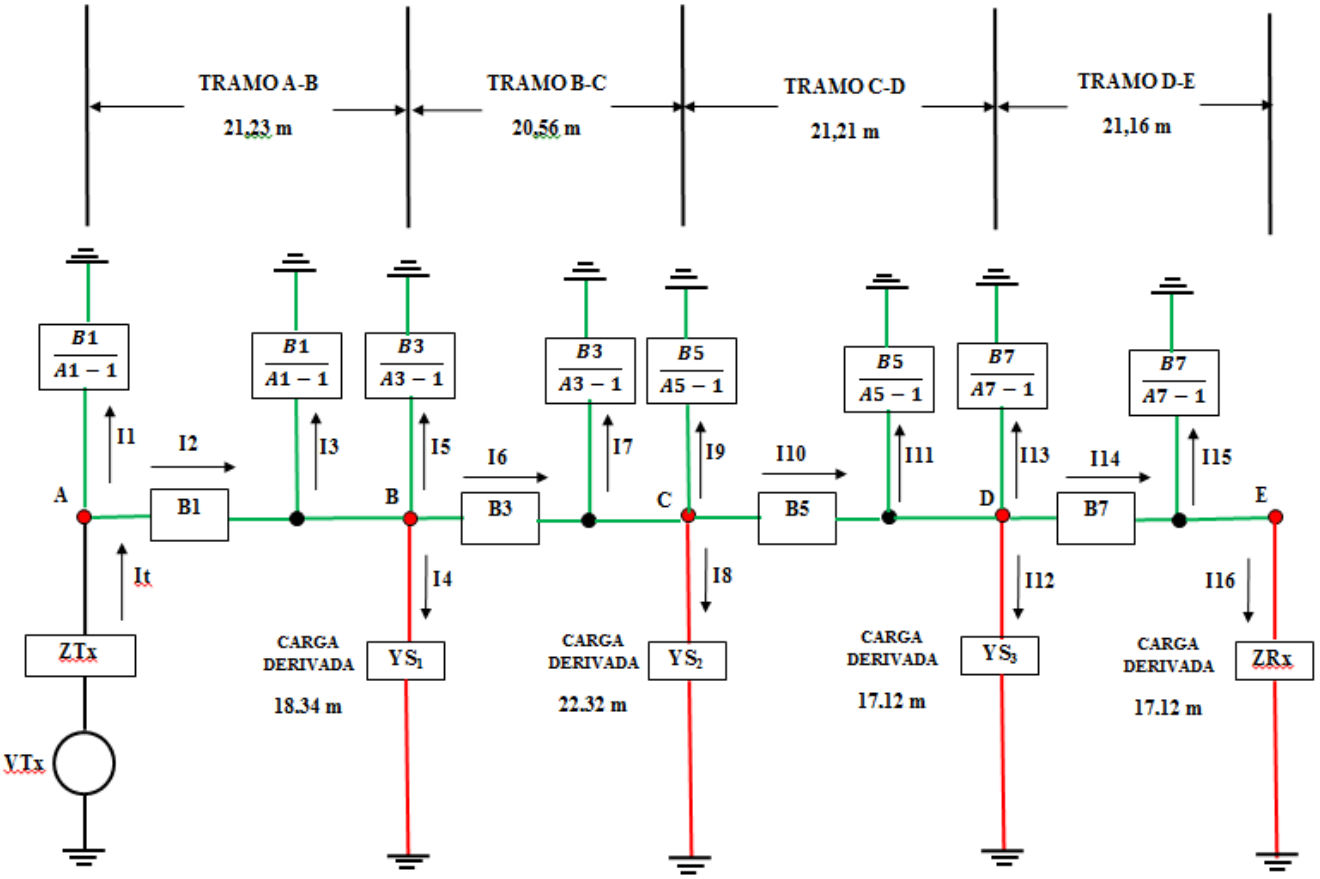


Figura 4.5: Representación de la topología monofásica en líneas de transmisión. Modelos de dos puertas

Fuente: el autor

$$I_t = I_1 + I_2 \iff \frac{V_{TX} - V_A}{Z_{TX}} = \frac{V_A - V_B}{B_1} + \frac{[A_1 - 1] * V_A}{B_1} \tag{4.24}$$

$$\frac{V_{TX}}{Z_{TX}} = [\frac{1}{Z_{TX}} + \frac{A_1}{B_1}] * V_A - \frac{V_B}{B_1} \tag{4.25}$$

$$I_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \iff \frac{V_A - V_B}{B_1} = \frac{[A_1 - 1] * V_B}{B_1} + [Y_{S1} * V_B] + \frac{[A_3 - 1] * V_B}{B_3} + \frac{V_B - V_C}{B_3} \tag{4.26}$$

$$-\frac{V_A}{B_1} + [\frac{A_1}{B_1} + \frac{A_3}{B_3} + Y_{S1}] * V_B - \frac{V_C}{B_3} = 0 \tag{4.27}$$

$$I_6 = I_7 + I_8 + I_9 + I_{10} \iff \frac{V_B - V_C}{B_3} = \frac{[A_3 - 1] * V_C}{B_3} + [Y_{S2} * V_C] + \frac{[A_5 - 1] * V_C}{B_5} + \frac{V_C - V_D}{B_5} \tag{4.28}$$

$$-\frac{V_B}{B_3} + [\frac{A_3}{B_3} + \frac{A_5}{B_5} + Y_{S2}] * V_C - \frac{V_D}{B_5} = 0 \tag{4.29}$$

$$I_{10} = I_{11} + I_{12} + I_{13} + I_{14} \iff \frac{V_C - V_D}{B_5} = \frac{[A_5 - 1] * V_D}{B_5} + [Y_{S3} * V_D] + \frac{[A_7 - 1] * V_D}{B_7} + \frac{V_D - V_E}{B_7} \tag{4.30}$$

$$-\frac{V_C}{B_5} + [\frac{A_5}{B_5} + \frac{A_7}{B_7} + Y_{S3}] * V_D - \frac{V_E}{B_7} = 0 \tag{4.31}$$

$$I_{14} = I_{15} + I_{16} \iff \frac{V_D - V_E}{B_7} = \frac{[A_7 - 1] * V_E}{B_7} + \frac{V_E}{Z_{RX}} \tag{4.32}$$

$$-\frac{V_D}{B_7} + [\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{Z_{RX}}] * V_E = 0 \tag{4.33}$$

Organizando las ecuaciones (4.24) a (4.33) se obtiene el sistema simétrico ampliado (4.34).

$$\begin{bmatrix} \frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A1}{B1} + \frac{1}{ZTx} & \frac{-1}{B1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{B1} & \frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1 & \frac{-1}{B3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{B3} & \frac{A3}{B3} + \frac{A5}{B5} + Ys2 & \frac{-1}{B5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{B5} & \frac{A5}{B5} + \frac{A7}{B7} + Ys3 & \frac{-1}{B7} \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{-1}{B7}) & \frac{A7}{B7} + \frac{1}{ZR_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(f) \\ V_B(f) \\ V_C(f) \\ V_D(f) \\ V_E(f) \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

Un procedimiento similar al anterior, se aplica a la topología monofásica de prueba para tres nodos, que se muestra en la Figura 4.6.

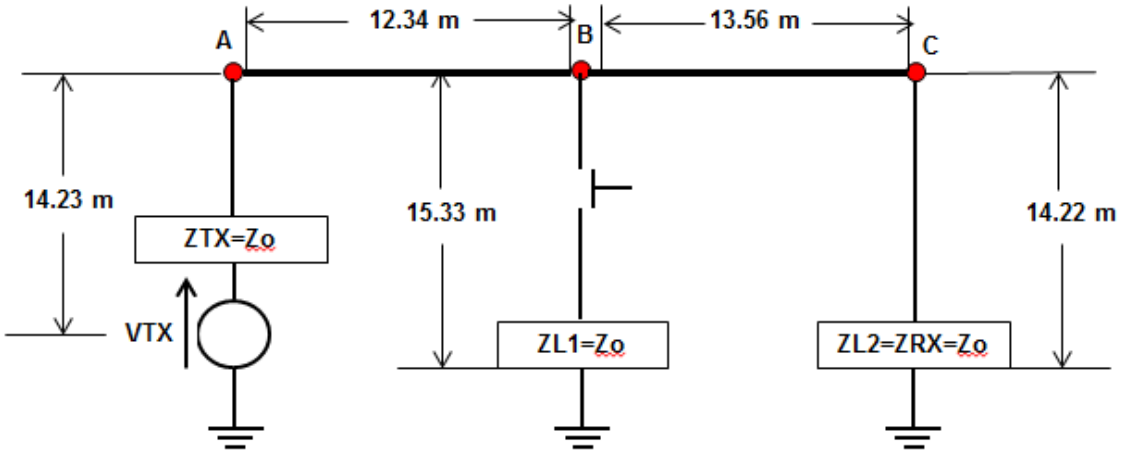


Figura 4.6: Red parcial de prueba para tres nodos
Fuente: el autor

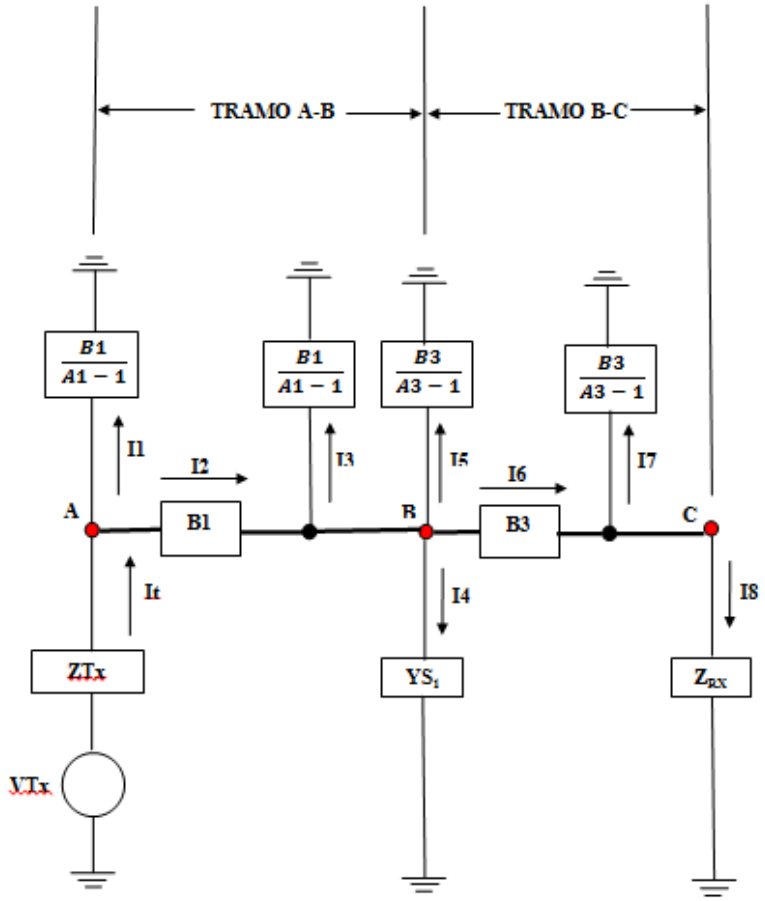


Figura 4.7: Red parcial de prueba para tres nodos, en modelos de dos puertas
Fuente: el autor

El modelo en redes de dos puertas para la red de la Figura 4.6, se muestra en la Figura 4.7. De igual forma, operando sobre los nodos de la red representada en modelos de dos puertas y aplicando (4.23), se obtiene el sistema simétrico (4.35).

$$\begin{bmatrix} \frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A1}{B1} + \frac{1}{ZTx} & \frac{-1}{B1} & 0 \\ \frac{-1}{B1} & \frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1 & \frac{-1}{B3} \\ 0 & \frac{-1}{B3} & \frac{A3}{B3} + \frac{1}{ZR_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(f) \\ V_B(f) \\ V_C(f) \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Capítulo 5

Implementación de la propuesta

A continuación se muestra en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 (Partes: I, II y III) respectivamente, el algoritmo implementado para desarrollar el método de diseño de filtros, en el algoritmo se incluyen las etapas previas, de cálculo y propiamente de diseño descritas en el Capítulo 3.Se debe anotar que para cada análisis de respuesta en frecuencia, se diseñan dos programas: uno para tener resultados de respuesta al impulso y otro para determinar el comportamiento lineal o los denominados valores medios geométricos.

Posteriormente se obtienen las funciones de transferencia del canal que establece cada carga derivada respecto a la fuente BPL,el diseño del filtro asociado a este canal, la densidad espectral de potencia y capacidad de canal; sobre la sección característica de la topología monofásica (3 Nodos) y sobre la topología general (5 Nodos) propuestas, ajustando la DEP de transmisión entre -52 dBm/Hz y -60 dBm/Hz [28] y utilizando como cargas derivadas la impedancia característica, para obtener transferencia máxima de potencia.

5.1. Algoritmo para implementar la metodología

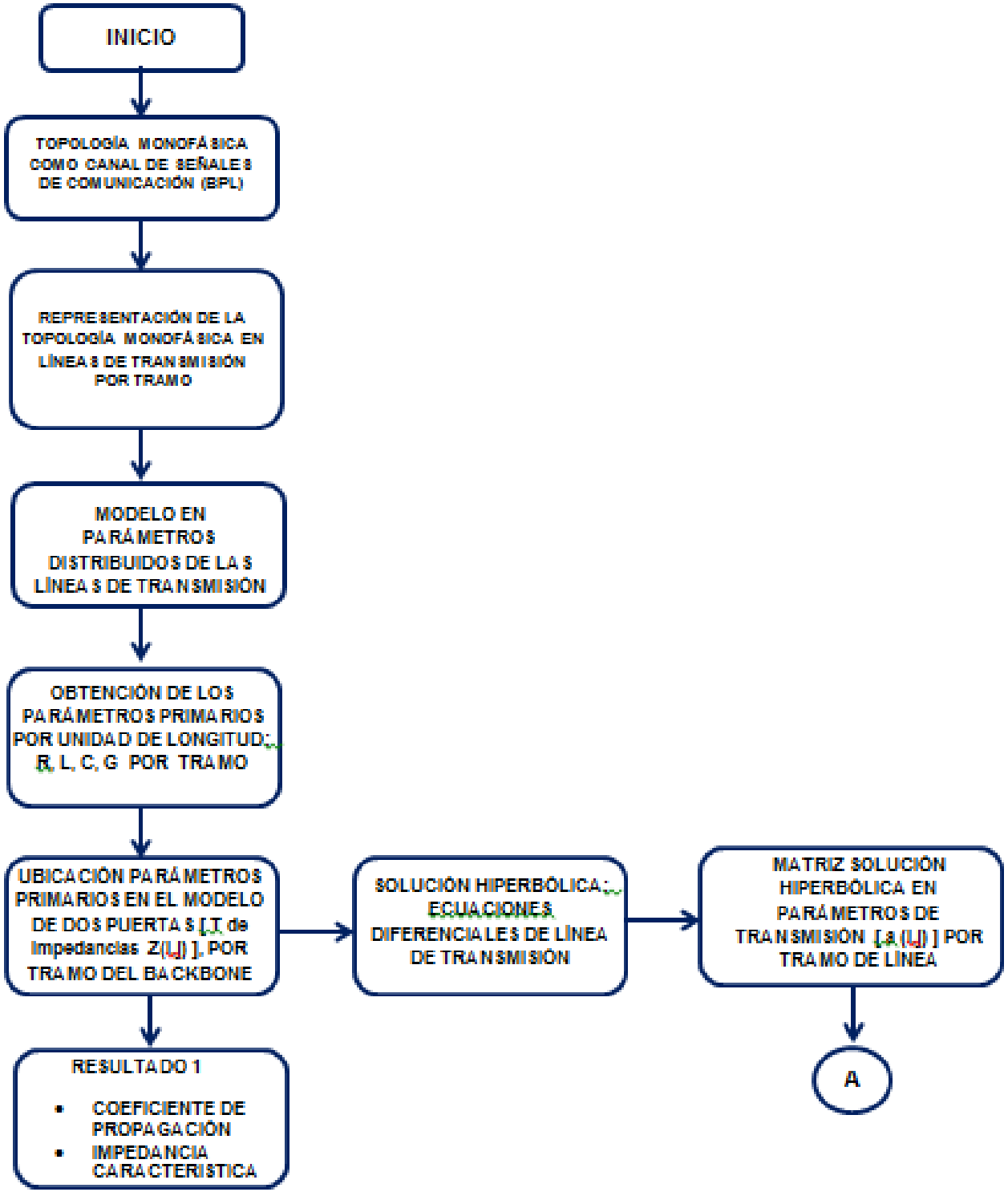


Figura 5.1: Algoritmo - Parte I
Fuente: el autor

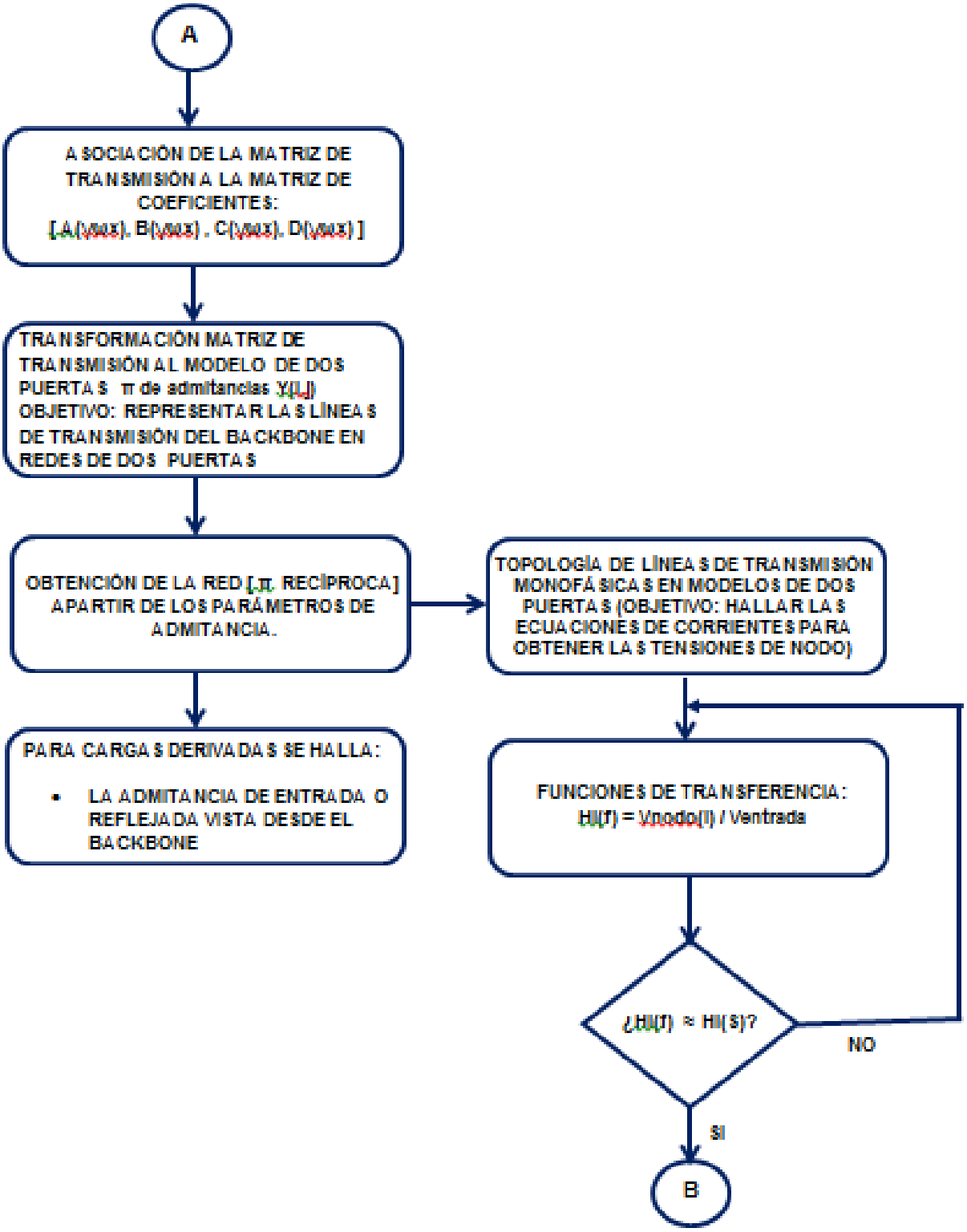


Figura 5.2: Algoritmo - Parte II
Fuente: el autor

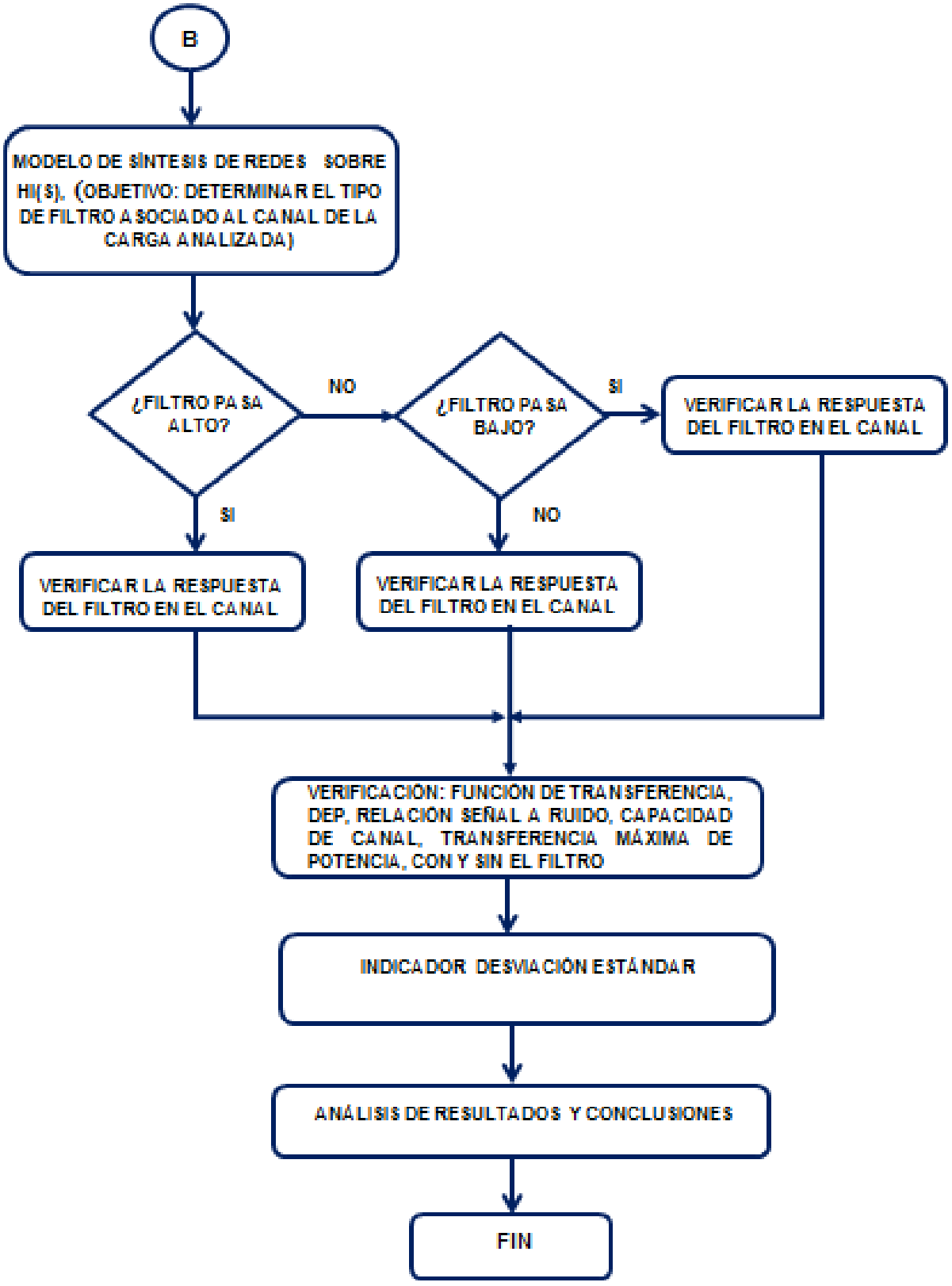


Figura 5.3: Algoritmo - Parte III
Fuente: el autor

5.2. Funciones de transferencia

Para determinar las funciones de transferencia [17], se accede a los sistemas encontrados en (4.34) y (4.35), -para 5 y 3 nodos respectivamente- que poseen la información de la topología monofásica, con cargas derivadas igual a la impedancia característica de cada tramo.

El primer paso, es hallar el determinante del sistema (4.34), denominado Δ_{5Nodos}, de este, se obtiene el determinante del sistema (4.35), denominado Δ_{3Nodos}.

$$\begin{aligned}\Delta_{5Nodos} = (\frac{-1}{B1}).(\frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx}).[(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{ZRx})\\ -(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{1}{B7})^2-(\frac{1}{B5})^2.(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{ZRx})]+(\frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx}).(\frac{1}{B3})^2\\ .[(\frac{1}{B7})^2-(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{ZRx})]+(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{1}{B1})^2\\ .[(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{ZRx})-(\frac{1}{B7})^2]\end{aligned}$$

El segundo procedimiento, es asignar variables a los coeficientes del sistema (4.34), para operacionalizar las expresiones.

$$K0 = (\frac{A7}{B7}+\frac{1}{ZRx}) \tag{5.1}$$

$$K1 = (\frac{-1}{B1}) \tag{5.2}$$

$$K2 = (\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2) \tag{5.3}$$

$$K3 = (\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3) \tag{5.4}$$

$$K4 = (\frac{1}{B5})^2 \tag{5.5}$$

$$K5 = (\frac{1}{B3})^2 \tag{5.6}$$

$$K6 = (\frac{1}{B7})^2 \tag{5.7}$$

$$K7 = (\frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx}) \tag{5.8}$$

$$K8 = (\frac{1}{B3}) \tag{5.9}$$

$$K9 = (\frac{1}{B5}) \tag{5.10}$$

$$K10 = (\frac{1}{B7}) \tag{5.11}$$

$$K11 = (\frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1) \tag{5.12}$$

$$K12 = (\frac{A3}{B3} + \frac{1}{ZRx}) \tag{5.13}$$

Las expresiones para las funciones de transferencia de los canales asociados a la topología monofásica de 5 nodos se muestran a continuación. Estas funciones de transferencia, corresponden al canal que establece la carga derivada respecto a la fuente BPL.

$$\Delta_{5Nodos} = K1.K7.[K0.K2.K3 - K2.K6 - K0.K4] + K5.K7.[K6 - K0.K3] - K0.K2.[K0.K3 - K6] \tag{5.14}$$

$$H_1(f)_{5Nodos} = H_1(\frac{V_A}{V_s}) = \frac{[K0.(K1.(K2.K3 - K4) - K3.K5) + K6.(K5 - K1.K2)]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.15}$$

$$H_2(f)_{5Nodos} = H_2(\frac{V_B}{V_s}) = \frac{-K1.[K2.(K3.K0 - K6) - (K0.K4)]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.16}$$

$$H_3(f)_{5Nodos} = H_3(\frac{V_C}{V_s}) = \frac{[K1.K5.(K0.K3 - K6)]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.17}$$

$$H_4(f)_{5Nodos} = H_4(\frac{V_D}{V_s}) = \frac{[-K0.K1.K8.K9)]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.18}$$

$$H_5(f)_{5Nodos} = H_5(\frac{V_E}{V_s}) = \frac{[-K1.K8.K9.K10]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.19}$$

Las expresiones para las funciones de transferencia de los canales asociados a la topología monofásica de prueba con 3 nodos se muestran a continuación.

$$\Delta_{3Nodos} = K7.[K11.K12 - K5] - K1.[K1.K12] \tag{5.20}$$

$$H_1(f)_{3Nodos} = H_1(\frac{V_A}{V_s}) = \frac{[K11.K12 - K5]}{[\Delta_{3Nodos}.ZT_x]} \tag{5.21}$$

$$V_s = \frac{VT_x.Z_o}{(Z_o + ZT_x)} \tag{5.22}$$

$$H_2(f)_{3Nodos} = H_2(\frac{V_B}{V_s}) = \frac{(Z_o + ZT_x).(B3 + A3.ZR_x)}{[\Delta_{3Nodos}.ZT_x.ZR_x.Z_o.B1.B3]} \tag{5.23}$$

$$H_3(f)_{3Nodos} = H_3(\frac{V_C}{V_s}) = \frac{-(Z_o + ZT_x)}{[\Delta_{3Nodos}.ZT_x.Z_o.B1.B3]} \tag{5.24}$$

A continuación, se muestran las expresiones de las funciones de transferencia entre los Nodos extremos de las topologías monofásicas propuestas, para 3 y 5 nodos (backbone).

Para hallar la función de transferencia entre los Nodos extremos de la topología de 3 Nodos, se utilizan las expresiones (5.22) y (5.24) y se obtiene (5.25), que corresponde a la función de transferencia del canal del backbone:

$$H_{CANALbackbone}(f)_{3Nodos} = H(\frac{V_s - V_C}{V_s}) = 1 + \frac{(Z_o + ZT_x)}{[\Delta_{3Nodos}.ZT_x.Z_o.B1.B3]} \tag{5.25}$$

Para la función de transferencia entre los Nodos extremos de la topología de 5 Nodos, se utilizan las expresiones (5.19) y (5.22) y se obtiene (5.26), que corresponde a la función de transferencia del canal del backbone:

$$H_{CANALbackbone}(f)_{5Nodos} = H(\frac{V_s - V_E}{V_s}) = 1 + \frac{[K1.K8.K9.K10]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]} \tag{5.26}$$

$$H_{CANALbackbone}(f)_{5Nodos} = H(\frac{V_s - V_E}{V_s}) = 1 + \frac{[(\frac{-1}{B1}).(\frac{1}{B3}).(\frac{1}{B5}).(\frac{1}{B7})]}{[\Delta_{5Nodos}.ZT_x]}$$

Para el caso de las funciones de transferencia entre los extremos de la topología, cuando se reemplaza la carga derivada más alejada de la fuente BPL, por el filtro estimado [como se demostrará más adelante], los resultados previos,se muestran en las ecuaciones (5.27) y (5.28), para las topologías monofásicas propuestas de 3 y 5 nodos respectivamente.

$$H_{CANALbackbone\ filtro}(f)_{3Nodos} = H(\frac{Vs_{filtro} - VC_{filtro}}{Vs_{filtro}}) = 1 + \frac{(Z_o + ZT_x)}{B1.B3.ZT_x.Z_o.\Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.27}$$

$$H_{CANALbackbone\ filtro}(f)_{5Nodos} = H_5(\frac{Vs_{filtro} - VE_{filtro}}{Vs_{filtro}}) = 1 + \frac{[K1.K8.K9.K10]}{[\Delta_{5Nodos.filtro}.ZT_x]} \tag{5.28}$$

$$H_{CANALbackbone\ filtro}(f)_{5Nodos} = H_5(\frac{Vs_{filtro} - VE_{filtro}}{Vs_{filtro}}) = 1 + \frac{[(\frac{-1}{B1}).(\frac{1}{B3}).(\frac{1}{B5}).(\frac{1}{B7})]}{[\Delta_{5Nodos.filtro}.ZT_x]}$$

Donde:

-Δ_{3Nodos}, determinante del sistema para la topología de 3 Nodos, ecuación (5.20).

-$\Delta_{3Nodosfiltro}$, determinante del sistema probando el filtro estimado para la topología de 3 Nodos, relación (5.35).

-Δ_{5Nodos}, determinante del sistema para la topología de 5 Nodos, ecuación (5.14).

-$\Delta_{5Nodosfiltro}$, determinante del sistema probando el filtro estimado para la topología de 5 Nodos, relación (5.65).

-ZT_x,impedancia de transmisión,considerada igual a la impedancia característica.

-Z_o,impedancia característica.

5.3. Funciones de transferencia, topología de 3 Nodos

Para validar los resultados obtenidos en este estudio, con los resultados experimentales realizados por Bostoen y Van de Wiel [1], es necesario en primera instancia realizar las simulaciones para obtener las tensiones en función de la frecuencia, para diferentes puntos de la topología de la Figura 4.6.

La relación entre la tensión de la carga del nodo A y la tensión de entrada derivada V_s **(5.22)**, muestra la función de transferencia encontrada **(5.21)**, donde aparecen la mayoría de coeficientes y variables considerados en este estudio.

En la Figura 4.6 se muestra la red parcial que se utilizó para obtener las funciones de transferencia. El recurso de simulación de "switchear" una carga derivada, es equivalente a tener una fuente variable y permite obtener resultados reales. La Figura 5.4 muestra la función de transferencia del canal que establece la carga derivada del Nodo A, obtenida con este recurso.

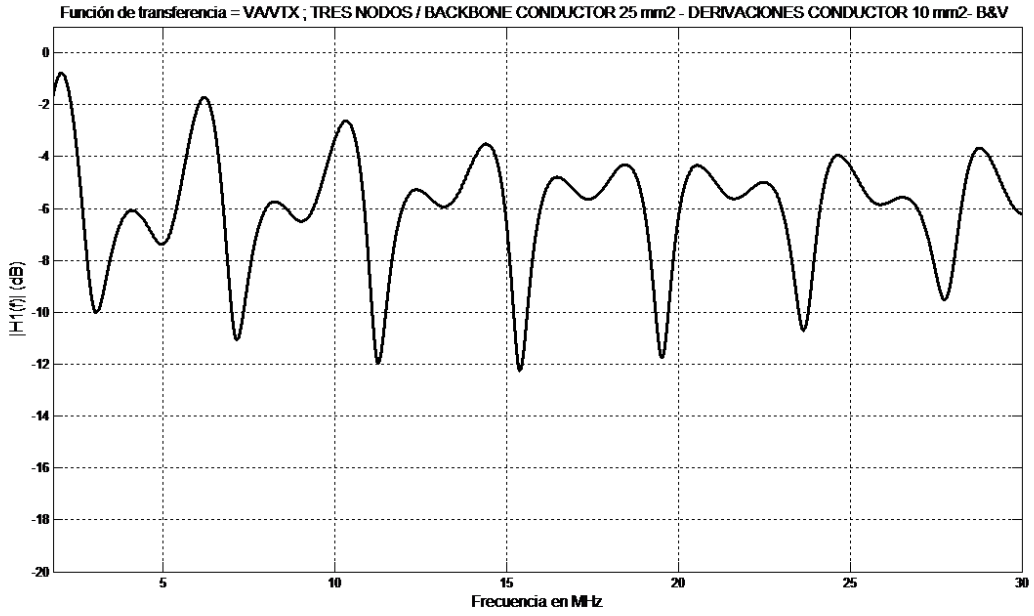


Figura 5.4: Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran las funciones de transferencia de los canales que establecen las cargas derivadas de los Nodo B y Nodo C, obtenidas de (5.23) y (5.24) respectivamente.

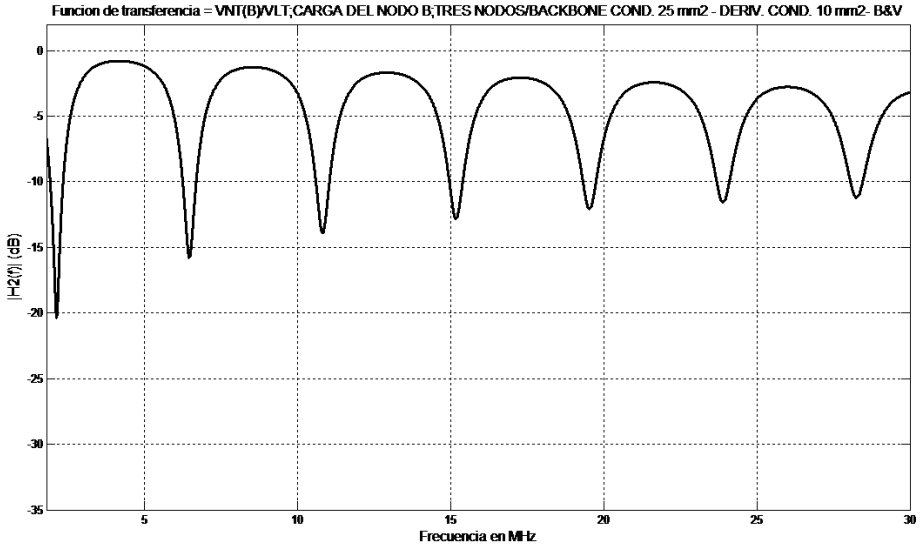


Figura 5.5: Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

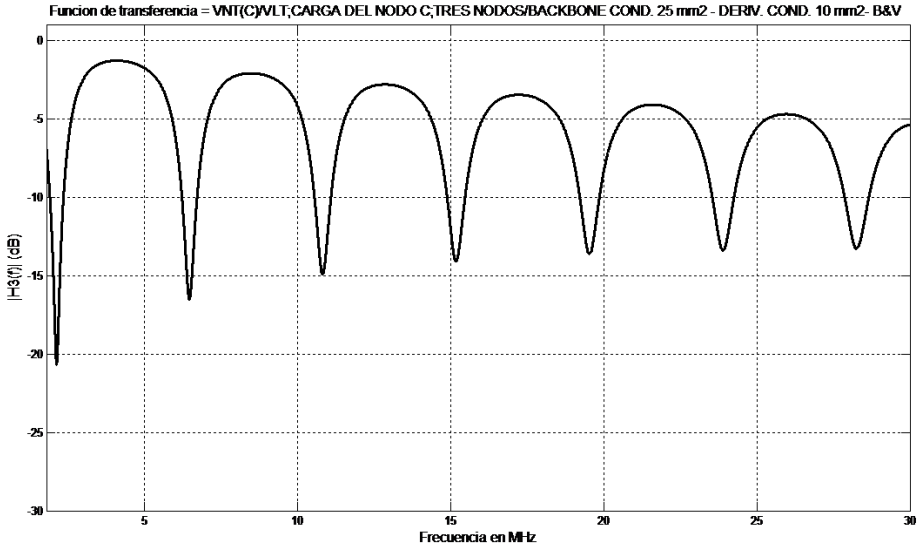


Figura 5.6: Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

El modelo que se utiliza en este estudio, para el análisis del comportamiento de las funciones de transferencia en función de la frecuencia, es el valor medio geométrico, que se desarrolla en la siguiente sección.

Para la simulación de las funciones de transferencia en función de la frecuencia, se utilizó el **Programa # 5** (Ver Anexo de programas).

5.3.1. Valor medio geométrico de las Funciones de transferencia, topología de 3 Nodos

Para determinar las características de los filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas, es necesario hallar el valor geométrico de las funciones de transferencia calculadas en la sección 5.3. Por la complejidad de estas funciones, se utiliza el método gráfico, suprimiendo el "switch".

La Figura 5.7, muestra la función de transferencia para el Nodo A, obtenida por este método .

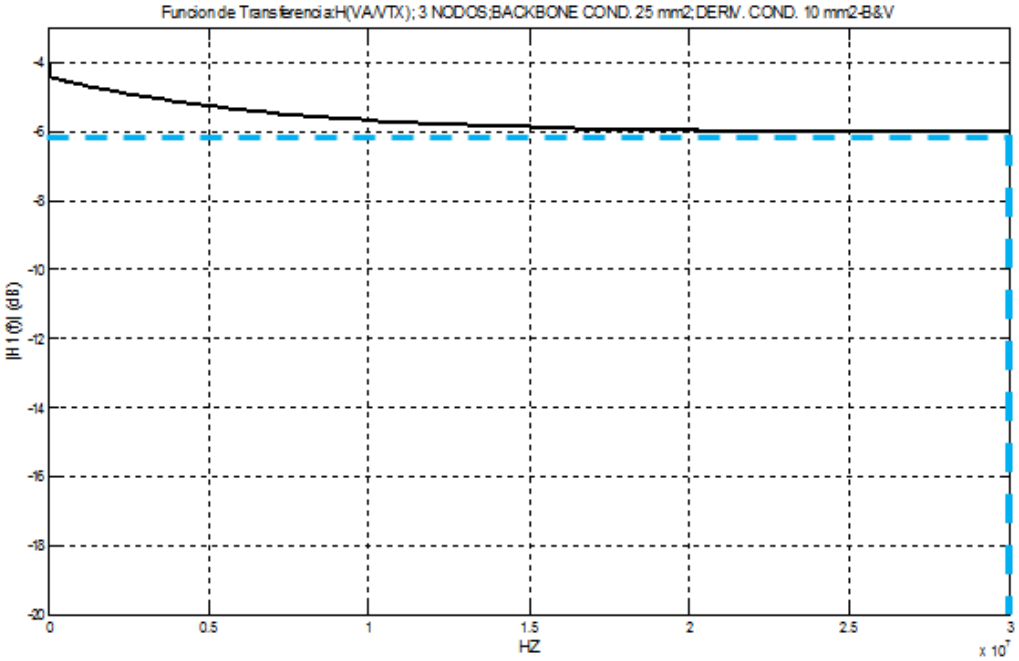


Figura 5.7: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VTX}$).Figura 5.1. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

En la Figura 5.8, se muestra el procedimiento realizado sobre la función de transferencia del canal que establece la carga del Nodo A, obtenida mediante "switcheo". La línea de guiones rojos, representa el valor medio geométrico. La línea de guiones azules, esta a -3dB de la roja, para determinar la frecuencia de corte (fc), que corresponde a fc = 30 MHz.

Se observa una atenuación de -6.0 dB a 30 MHz. Para el canal de la carga del Nodo A, se presenta un filtro pasa-bajo de orden 2 (40 dB/dec), con frecuencia de corte en 30 MHz. Similar procedimiento se realiza con las otras funciones de transferencia.

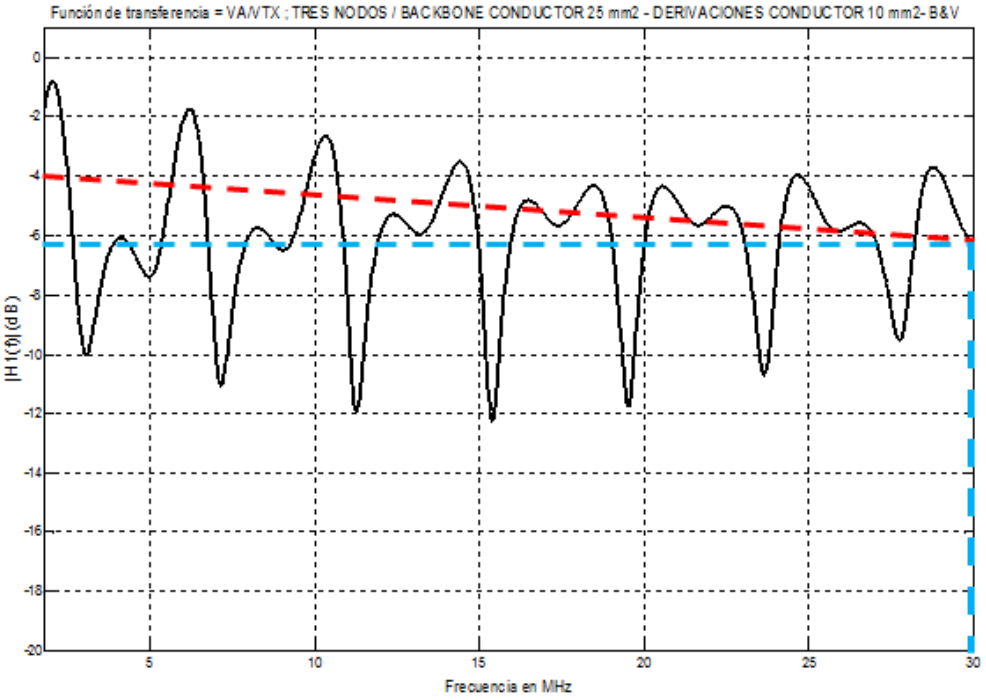


Figura 5.8: Interpretación del valor medio geométrico en la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VTX}$). Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

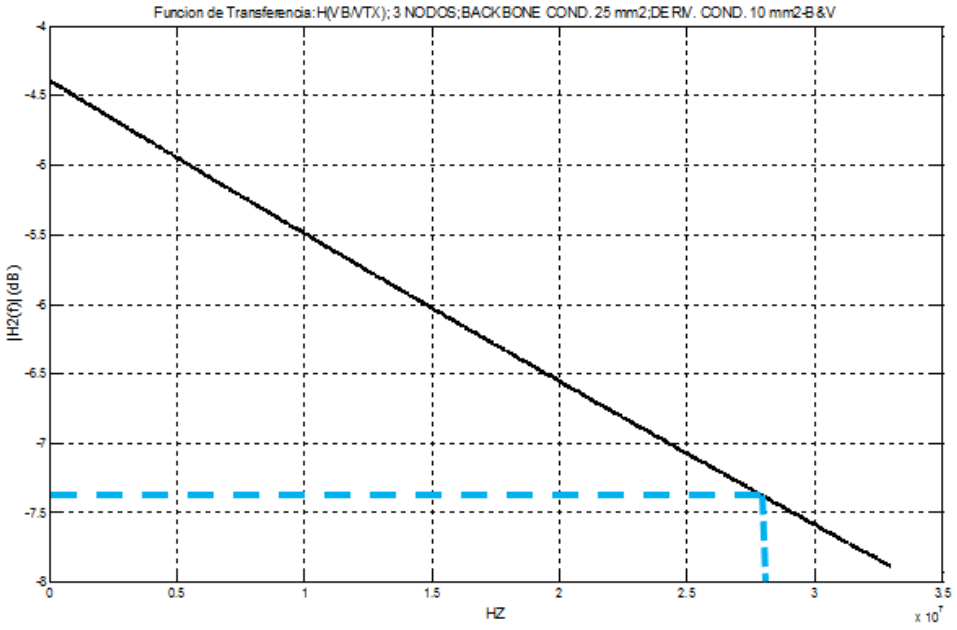


Figura 5.9: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Figura 5.2. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

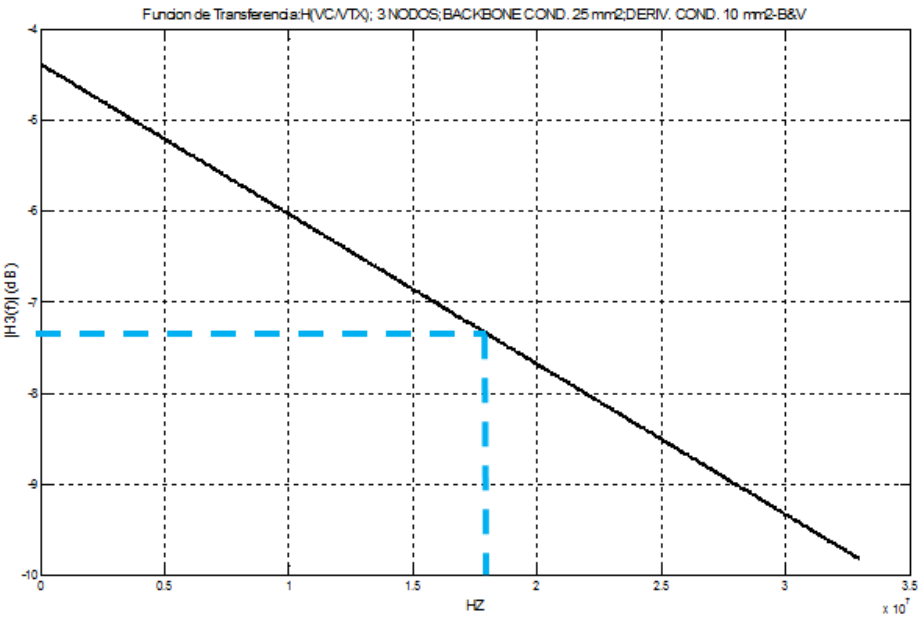


Figura 5.10: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Figura 5.3. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

En la Figura 5.9, el canal que establece la carga del Nodo B, a -3dB tiene una frecuencia de corte fc= 30 Mhz y se observa una atenuación de -7.7 dB a 30 MHz, se presenta un filtro pasa-bajo de orden 2 (40 dB/dec).El canal que establece la carga del Nodo C, Figura 5.10, a -3dB tiene una frecuencia de corte fc= 30 Mhz y se observa una atenuación de -9.5 dB a 30 MHz, presenta un filtro pasa-bajo de orden 2 (40 dB/dec). En la Tabla [5.1], se muestra el resumen sobre las funciones de transferencia encontradas.

Tabla 5.1: Resumen: Funciones de Transferencia topología de 3 nodos.

CANAL CARGA DEL NODO	TIPO DE FILTRO ENCONTRADO	ATENUACIÓN A 30 MHz (dB)	FRECUENCIA DE CORTE A -3 dB (MHz)	MAGNITUD (dB/década)
A	Pasa-Bajo	-6.0	30	40
B	Pasa-Bajo	-7.7	27.50	40
C	Pasa-Bajo	-9.5	17.50	40

Fuente: elaboración propia

La Tabla [5.1], muestra que el canal que establece la carga derivada del Nodo C, experimenta el comportamiento de un filtro pasa-bajo con atenuación a 30 MHz de (-9.50 dB) y frecuencia de corte a - 3 dB (17.50 MHz), elementos suficientes en el diseño del Filtro asociado a este canal.

5.3.2. Características de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas en la topología de 3 Nodos

Para determinar las características de los filtros, se procede a obtener las "nuevas" funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia compleja "S" utilizando iteraciones sucesivas mediante métodos numéricos [18], que presenten un comportamiento similar a las funciones de transferencia obtenidas en (5.21), (5.23) y (5.24).

Una vez establecidas, se realiza un programa en MATLAB que permita observar el diagrama de bode correspondiente. Cada diagrama de Bode obtenido, se compara con las Figuras 5.7, 5.9 y 5.10, se estimó un error en amplitud del 5 % por década que es aceptable para el objetivo propuesto.

Las funciones de transferencia asociadas a los canales [iteradas], se presentan en (5.29), (5.30) y (5.31). Los diagramas de bode aparecen en las Figuras 5.11, 5.14 y 5.17, respectivamente. Obtenidas las funciones de transferencia iteradas, se diseña un programa que permite introducir la función de transferencia y entrega los valores de los elementos que componen el filtro.

De acuerdo a los resultados observados en la Tabla 5.1 y el resultado del diagrama de Bode, se aplica el algoritmo de cálculo que determina los elementos del filtro asociado al canal que establece la carga derivada correspondiente. El resultado del algoritmo se muestra en las Figuras 5.12, 5.15 y 5.18. La red del Filtro pasivo de grado 2, que se obtuvo mediante el algoritmo, se muestra en las Figuras 5.13, 5.16 y 5.19. De acuerdo a la fase que muestran los diagramas de Bode, la impedancia de los filtros es de tipo capacitivo.

$$H_1(f)_{3Nodos} = H_1(\frac{V_A}{Vs_x}) = \frac{2{,}471S^2 + 132853484{,}333S + 0,618}{7S^2 + 228473412{,}500S + 1} \tag{5.29}$$

$$H_2(f)_{3Nodos} = H_2(\frac{V_B}{Vs_x}) = \frac{2{,}471S^2 + 62757411{,}443S + 0,618}{7S^2 + 107926412{,}500S + 1} \tag{5.30}$$

$$H_3(f)_{3Nodos} = H_3(\frac{V_C}{Vs_x}) = \frac{5{,}30e^{-24}\ S^2 + 2{,}43e^{-12}\ S + 4{,}02e^{-2}}{5{,}81e^{-22}\ S^2 + 2{,}55e^{-10}\ S + 1{,}00} \tag{5.31}$$

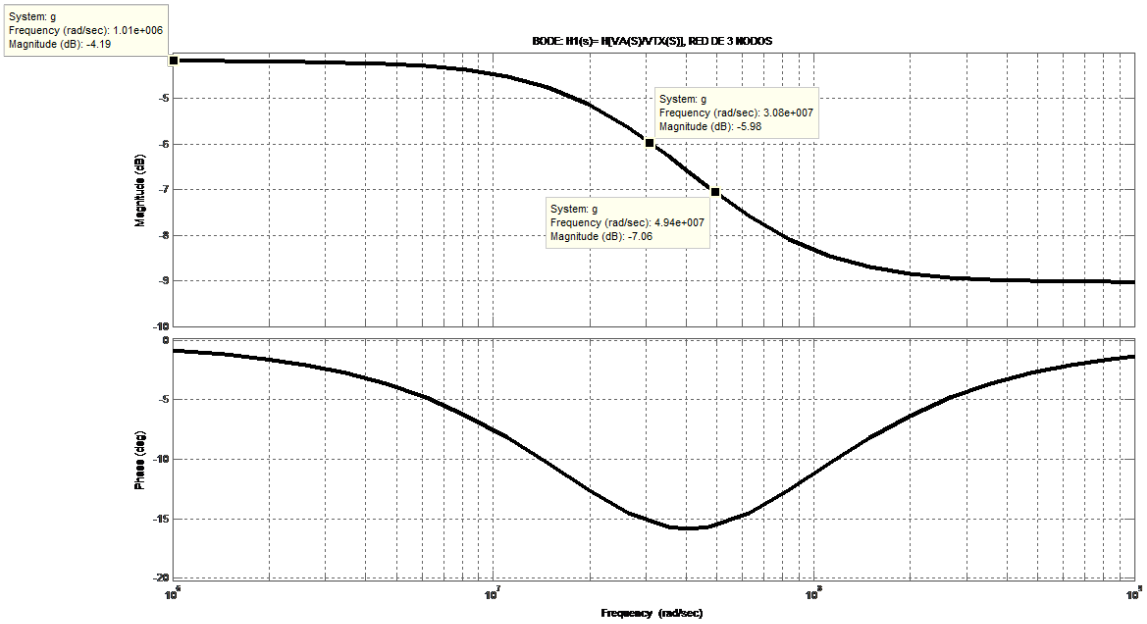


Figura 5.11: Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vsx}$). Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 3 NODOS / NODO A

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K	F.D.
2,471	132853484,333	0,618	0,000	7,000	228473412,500	1,000	-0,353
-2,471	-80661044,059	-0,353	0,000				
0,000	52192440,274	0,265	0,000	0,000	52192440,274	0,265	0,000
7,000	228473412,500	1,000	0,000				
-7,000	0,000	0,000	0,000	0,000	228473412,500	1,000	-0,228
0,000	228473412,500	1,000	0,000				
0,000	52192440,274	0,265	0,000	0,000	0,000	0,036	-1000146763,513
	-52192440,274	-0,228	0,000				
	0,000	0,036	0,000	0,000	228473412,500	1,000	-4,378
	228473412,500	1,000	0,000				
	0,000	0,000	0,000				
	228473412,500	1,000	0,000				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,353	0,0000000000	0,353		Ω
Y2(S)	0,000	0,0000001341		0,134	µF
Z3(S)	0,228	0,0000000000	0,228		Ω
Y4(S)	0,000	0,0000000010		0,001	µF
Z5(S)	4,378	0,0000000000	4,378		Ω

Figura 5.12: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vsx}$). Red de 3 Nodos.
Fuente: el autor

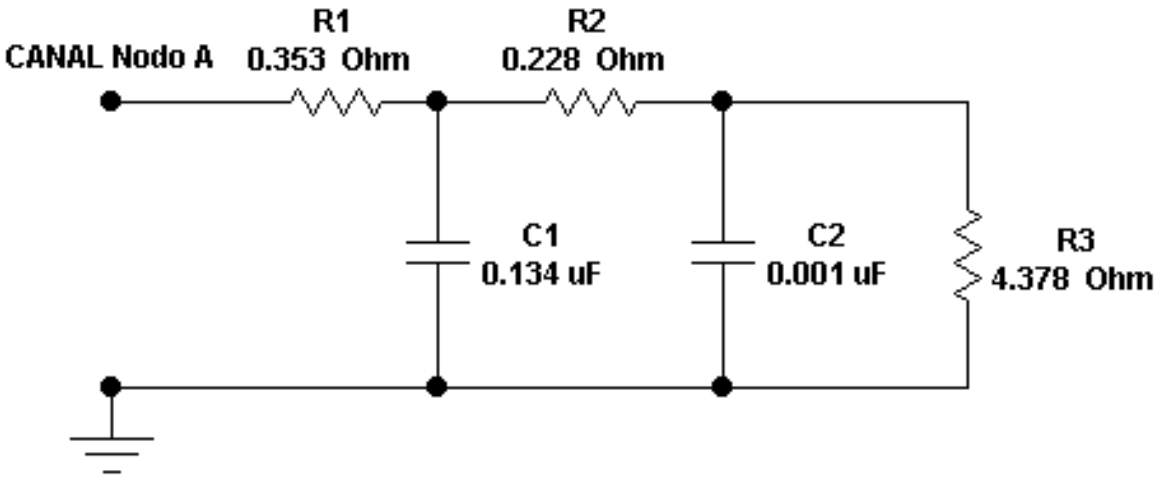


Figura 5.13: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo A. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

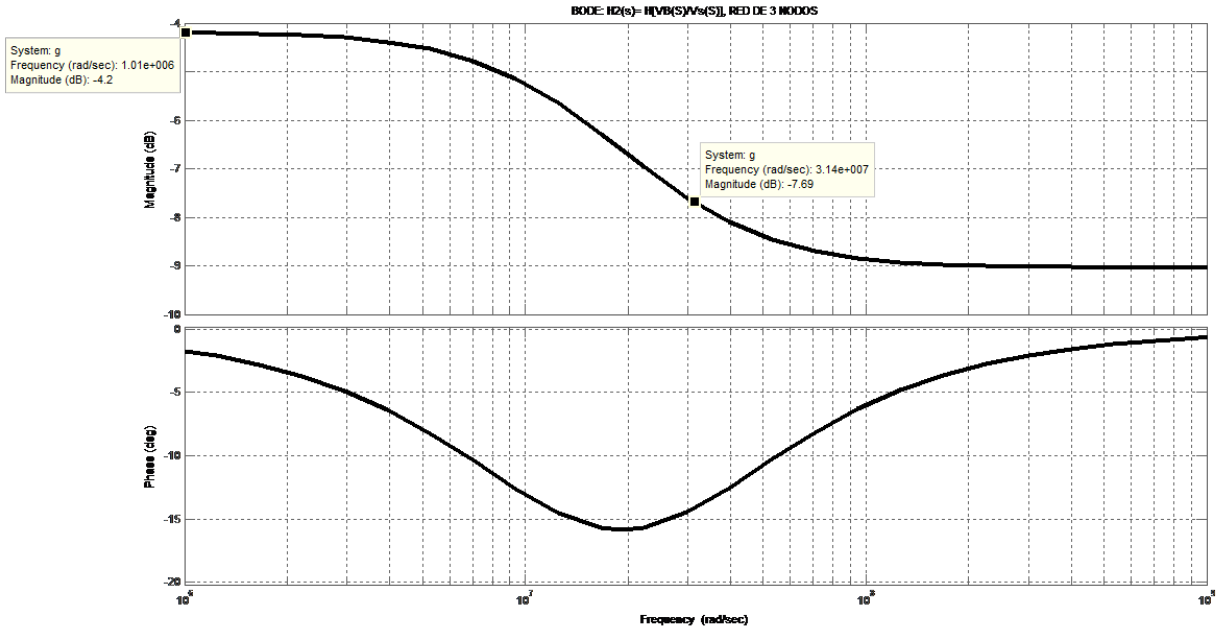


Figura 5.14: Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_2(\mathrm{f})|= \mathrm{H}(\frac{VB}{Vsx})$. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 3 NODOS / NODO B

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K	F.D.
2,471	62757411,443	0,618	0,000	7,000	107926412,500	1,000	-0,353
-2,471	-38102714,091	-0,353	0,000				
0,000	24654697,353	0,265	0,000	0,000	24654697,353	0,265	-0,000000284
7,000	107926412,500	1,000	0,000				
-7,000	-0,0000000752	0,000	0,000	0,000	107926412,500	1,000	-0,228
0,000	107926412,500	1,000	0,000				
0,000	24654697,353	0,265	0,000	0,000	0,000	0,036	-472449949,332
	-24654697,353	-0,228	0,000				
	0,000	0,036	0,000	0,000	107926412,500	1,000	-4,378
	107926412,500	1,000	0,000				
	0,000	0,000	0,000				
	107926412,500	1,000	0,000				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,353	0,0000000000	0,353		Ω
Y2(S)	0,000	0,0000002839		0,284	µF
Z3(S)	0,228	0,0000000000	0,228		Ω
Y4(S)	0,000	0,0000000021		0,002	µF
Z5(S)	4,378	0,0000000000	4,378		Ω

Figura 5.15: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vsx}$). Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

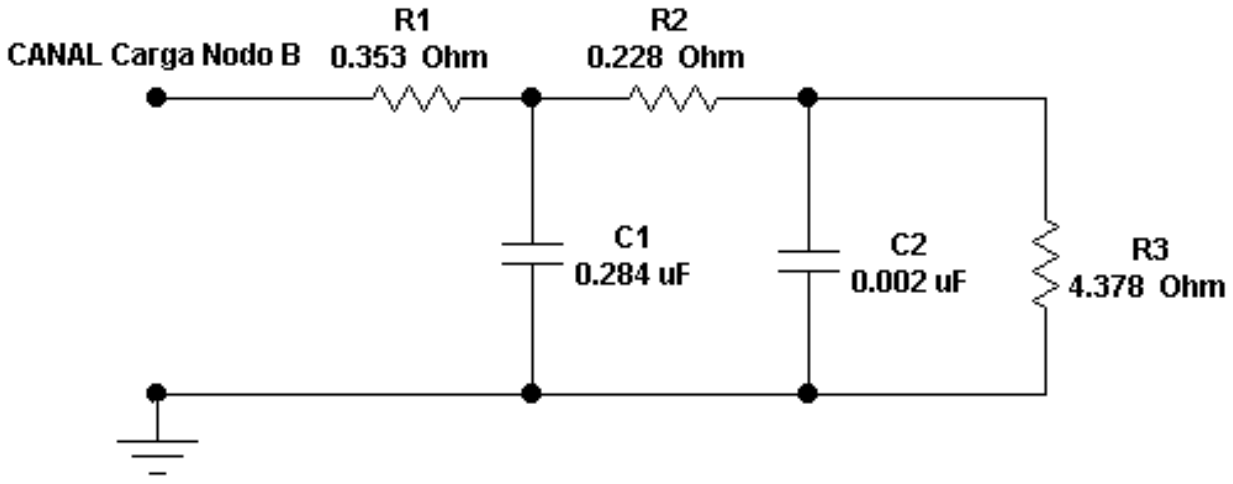


Figura 5.16: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo B. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

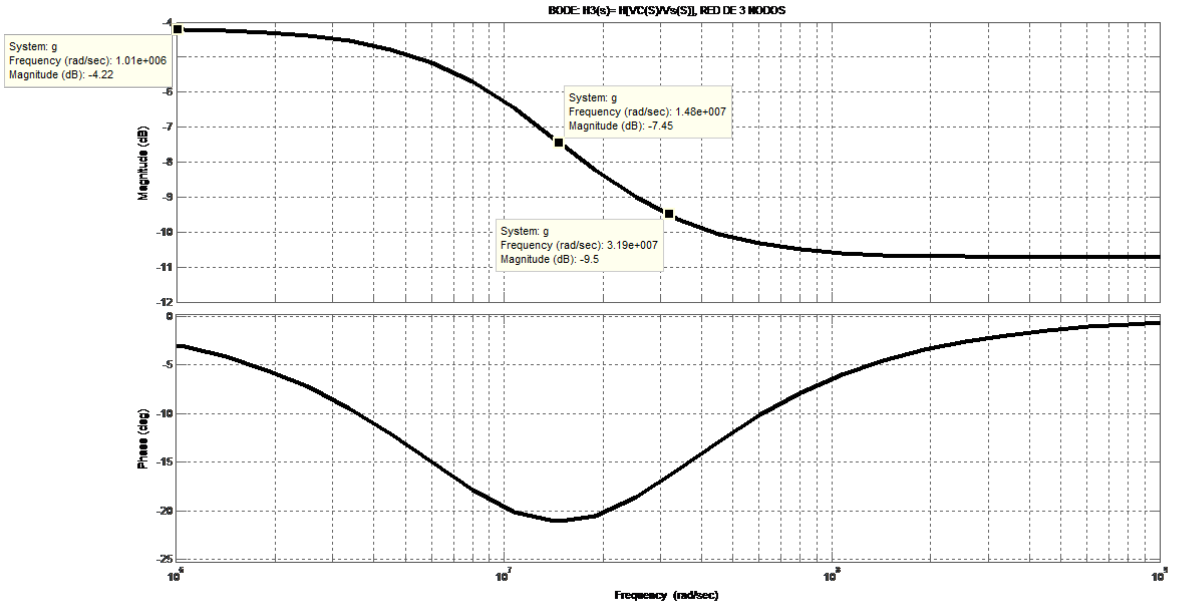


Figura 5.17: Diagrama de Bode para la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$). Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN. FILTRO CARGA NODO C

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K
5,30E-24	2,43E-12	4,02E-02	0,00E+00	5,81E-22	2,55E-10	1,00E+00
-5,30E-24	-2,32E-12	-9,12E-03	0,00E+00			
0,00E+00	1,07E-13	3,11E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,07E-13	3,11E-02
5,81E-22	2,55E-10	1,00E+00	0,00E+00			
-5,81E-22	-1,69E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,53E-11	1,00E+00
0,00E+00	8,53E-11	1,00E+00	0,00E+00			
0,00E+00	1,07E-13	3,11E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,98E-02
	-1,07E-13	-1,25E-03	0,00E+00			
	0,00E+00	2,98E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00
	8,53E-11	1,00E+00	0,00E+00			
	-8,53E-11	0,00E+00	0,00E+00			
	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00			
		2,98E-02	0,00E+00			
		-2,98E-02	0,00E+00			
		0,00E+00	0,00E+00			

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,009	0,00E+00	0,0091		Ω
Y2(S)	0,000	5,45E-09		0,0054	µF
Z3(S)	0,001	0,00E+00	0,0013		Ω
Y4(S)	0,000	2,86E-09		0,0029	µF
Z5(S)	0,030	0,00E+00	0,0298		Ω

Figura 5.18: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer1 sobre $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$). Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

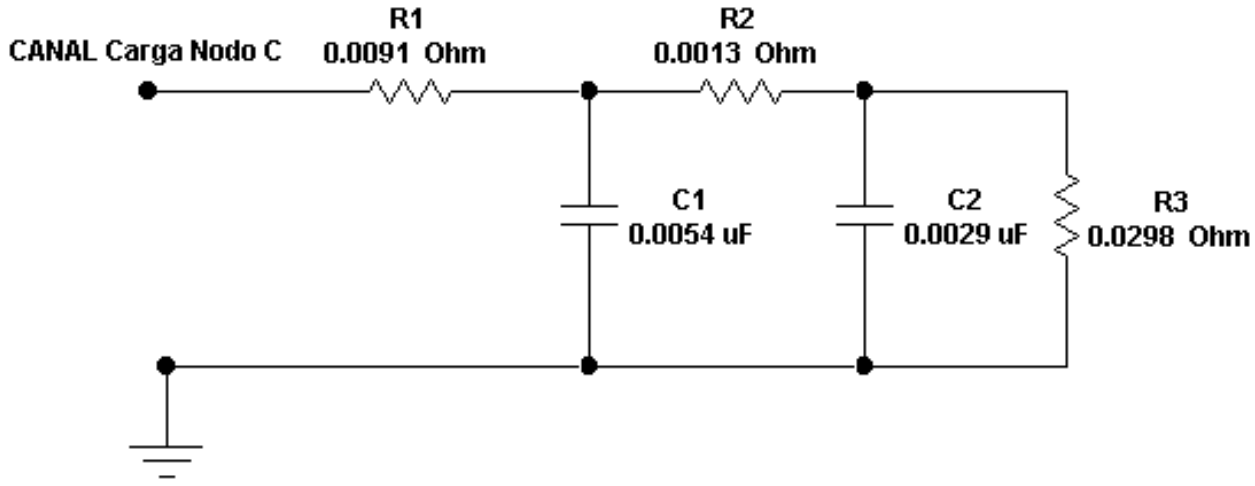


Figura 5.19: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

5.3.3. Verificación del Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Topología de 3 Nodos

En este apartado se verifica el efecto que produce sobre la función de transferencia del canal asociado a la carga derivada del Nodo C, reemplazar la carga derivada del Nodo C [impedancia característica], por la red del filtro estimado **Figura 5.19**. Se escoge esta carga, porque es la más alejada de la fuente BPL y presenta el mayor canal, para tal fin,por transferencia de potencia, se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Se determina la impedancia del Filtro $Z_{Rfiltro}$, utilizando los valores de los elementos de la red Figura 5.19, asociando un grupo de constantes, como se muestra en **Figura 5.20**, para determinar las relaciones (5.32) y (5.33).

$$Z_{Rfiltro}(f)_{3Nodos} = \frac{d10 * (j\omega)^2 + d13 * (j\omega) + d8}{d17 * (j\omega)^2 + d18 * (j\omega) + 1} \tag{5.32}$$

$$Z_{Rfiltro}(f)_{3Nodos} = \frac{(d8 - d10 * \omega^2) + (j\omega) * d13}{(1 - d13 * \omega)^2 + (j\omega) * d18} \tag{5.33}$$

FILTRO ESTIMADO CANAL CARGA NODO C

R1= 0,0091	Ω	=	0,0000091 KΩ
R2= 0,0013	Ω	=	0,0000013 KΩ
R3= 0,0298	Ω	=	0,0000298 KΩ
C1= 5,40E-09	F	=	0,00540 μ F
C2= 2,90E-09	F	=	0,00290 μ F

CONSTANTES ASOCIADAS AL FILTRO DEL CANAL CARGA DERIVADA DEL NODO C

R1*C1=d1=	4,925E-11	d11+d12+d13+d14=d15=	2,368E-12
R2*C2=d2=	3,770E-12	d3+d4+d5=d16=	3,892E-02
R3=d3=	2,980E-02	d6*d7=d17 =	6,067E-22
R2=d4=	7,020E-12	d6+d7+d8=d18 =	2,544E-10
R1=d5 =	9,121E-03		
R3*C2=d6=	8,642E-11		
R2*C1=d7=	7,020E-12		
R3*C1=d8=	1,609E-10		
d1*d2*d3 =d9	5,533E-24		
d1*d4=d11 =	3,458E-22		
d1*d3=d12 =	1,468E-12		
d5*d6=d13 =	7,882E-13		
d2*d3=d14 =	1,123E-13		

Figura 5.20: Valores de los elementos del Filtro asociado al canal de la Carga del Nodo C. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

Las Figuras 5.21 y 5.22, muestran la impedancia del filtro ($Z_{Rfiltro}$) y la impedancia característica (Zc),asociadas al canal que establece la carga derivada del Nodo C, en magnitud y fase en función de la frecuencia. Se observa que la impedancia del filtro es de tipo capacitivo y la impedancia característica, de tipo resistivo.

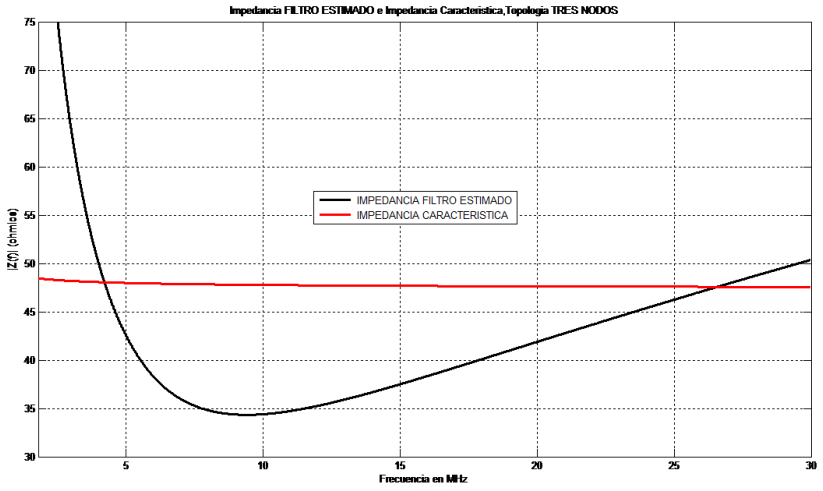


Figura 5.21: Impedancias del Filtro y Característica,asociadas al canal de la carga derivada del Nodo C, en función de la frecuencia. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

2. Referenciando la topología Figura 4.6, conectada la impedancia del filtro $Z_{Rfiltro}$, se ajusta

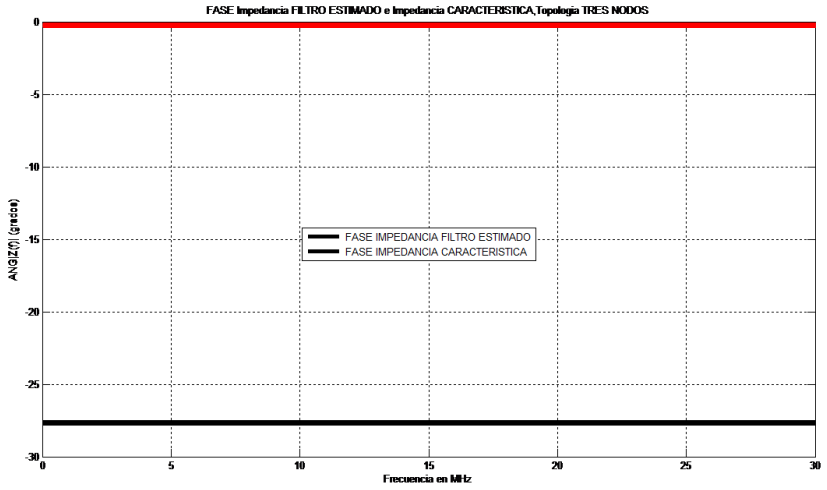


Figura 5.22: Fases Impedancia del Filtro y Característica, en función de la frecuencia. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

la DEP de transmisión en -55 dBm/Hz [28] y se opera sobre el sistema (5.34).

$$\begin{bmatrix} \frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A1}{B1} + \frac{1}{ZTx} & \frac{-1}{B1} & 0 \\ \frac{-1}{B1} & \frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1 & \frac{-1}{B3} \\ 0 & \frac{-1}{B3} & \frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{Rfiltro}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(f) \\ V_B(f) \\ V_C(f) \end{bmatrix} \tag{5.34}$$

3. Se halla el determinante del sistema con el filtro, expresión (5.35).

$$\Delta_{3Nodos.filtro} = (\frac{A1}{B1} + \frac{1}{ZTx}) * [(\frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1) * (\frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{Rfiltro}}) - \frac{1}{B3^2}] - [\frac{1}{B1^2} * (\frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{Rfiltro}})] \tag{5.35}$$

4. Las expresiones de voltaje encontradas aparecen en (5.36), (5.37), (5.38) y (5.39).

$$VA_{filtro} = \frac{\frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} * [(\frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1) * (\frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{Rfiltro}}) - \frac{1}{B3^2}]}{\Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.36}$$

$$VB_{filtro} = \frac{\frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} * [(\frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{Rfiltro}}) * \frac{1}{B1}]}{\Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.37}$$

$$VC_{filtro} = \frac{\frac{-VT_x(f)}{ZT_x(f)} * \frac{1}{B1} * \frac{1}{B3}}{\Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.38}$$

$$Vs_{filtro} = \frac{VT_x * Z_o}{(Z_o + ZT_x)} \tag{5.39}$$

5. Las correspondientes funciones de transferencia del canal asociado al filtro, aparecen en (5.40), (5.41) y (5.42).

$$H_{1filtro}(f)_{3Nodos} = H_1(\frac{VA_{filtro}}{VT_x}) = \frac{\frac{1}{ZT_x} * [(\frac{A1}{B1} + \frac{A3}{B3} + Ys1) * (\frac{A3}{B3} + \frac{1}{Z_{filtro}}) - \frac{1}{B3^2}]}{\Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.40}$$

$$H_{2filtro}(f)_{3Nodos} = H_2(\frac{VB_{filtro}}{Vs_{filtro}}) = \frac{(Z_o + ZT_x) * (B3 + A3 * Z_{filtro})}{B1 * B3 * ZT_x * Z_{filtro} * Z_o * \Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.41}$$

$$H_{3filtro}(f)_{3Nodos} = H_3(\frac{VC_{filtro}}{Vs_{filtro}}) = \frac{-(Z_o + ZT_x)}{B1 * B3 * ZT_x * Z_o * \Delta_{3Nodos.filtro}} \tag{5.42}$$

6. Como elemento de verificación sobre la operación del Filtro, se muestra la función de transferencia del canal asociado a la carga derivada del Nodo C, con y sin el filtro, que aparece en la Figura 5.23. Se observa que hasta 15 MHz, la función de transferencia con el filtro es mayor a la función de transferencia normal en 0.5 dB en promedio, después de 15 MHz, el comportamiento es similar. Este fenómeno, se va a reflejar sobre la DEP de Señal y la capacidad de canal.
NOTA:
-Las impedancias del filtro y característica, se calcularon con el **Programa # 7** (Ver Anexo de programas).
-La función de transferencia del canal con y sin el uso del filtro en la Carga del Nodo C, se obtuvo con el **Programa # 8** (Ver Anexo de programas).

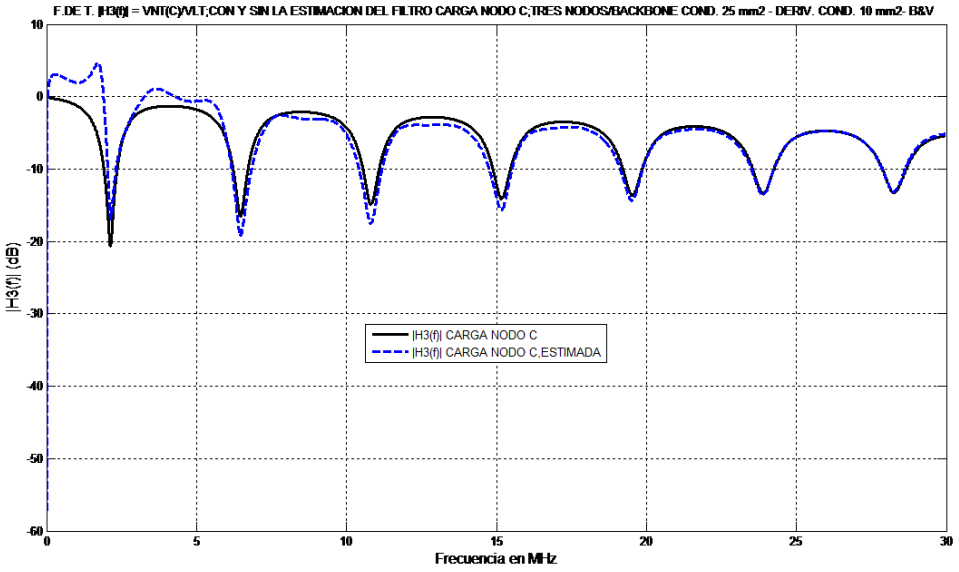


Figura 5.23: Función de Transferencia del Canal asociado a la carga del Nodo C $|H_{CANAL}(f)|$= H($\frac{VC}{Vsx}$), con y sin el filtro. Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

5.3.4. Efecto del Filtro sobre la DEP de Señal en el canal que establece la carga del Nodo C.Topología de 3 Nodos

La señal de comunicaciones al viajar por el canal, experimenta disminución en la potencia de transmisión siendo la principal causa la radiación (efecto antena de ruido debido a: las conexiones, la estructura de red, los acoples, la diferente impedancia por tramo, etc), esta disminución produce pérdidas en la potencia de transmisión y afecta la velocidad de transferencia de datos.

Algunas redes BPL Hogareñas Figura 2.3, por la combinación de distancia, constantes de atenuación y un ambiente de propagación multicamino hacen posible variar la función de transferencia del canal conservando la capacidad de transmisión con una menor DEP [6], de igual forma, algunos módems fijan la DEP de transmisión en -55 dBm/Hz independiente de la atenuación entre los dos dispositivos (transmisor - receptor).

La publicación de la IEEE en 2010, con el estándar 1901 [29], oficializa la tecnología BPL y especifica el valor de la densidad espectral de potencia (DEP) en -55 dBm/Hz, necesario para cumplir con lo que expresa la FCC [28], en su parte 15, sección 15.209, donde específica que el límite de un campo eléctrico radiado por un radiador no intencional en la banda de 1.705 a 30

MHz no debe exceder de 30 μV/m (29.5 dBμV/m) a 30 metros.

De acuerdo a lo anterior,para obtener la Densidad Espectral de Potencia de la señal recibida en nodos y cargas derivadas para una línea de transmisión que tiene una potencia de transmisión Pi o potencia de entrada y una potencia de salida Po, se expresa como aparece en (5.43):

$$S_r(f) = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_k^2}{V_{Tx}^2} = (\frac{V_k}{V_{Tx}})^2 \tag{5.43}$$

Como el campo eléctrico es proporcional a la tensión de nodo y la potencia es función de la relación de tensiones al cuadrado , la expresión (5.43) se transforma en (5.44), con unidades en decibelios.

$$dB = 10log_{10}\frac{P_o}{P_i} = 10log_{10}\frac{V_k^2}{V_{Tx}^2} = 10log_{10}(\frac{V_k}{V_{Tx}})^2 \tag{5.44}$$

En sistemas de comunicación los instrumentos de medida muestran la unidad dBm, como medida de modulación, la letra m adicionada a dB, indica un nivel relativo a la referencia de 1mW.

$$dBm = 10log_{10}[\frac{S_r(f)}{1mW}] \tag{5.45}$$

En este estudio, para expresar la DEP se procede así:

$$DEP = \frac{dBm}{frecuencia}; [\frac{dBm}{Hz}] \tag{5.46}$$

El resultado obtenido para la DEP de Señal en el canal de la carga del Nodo C, con y sin el Filtro ,se muestra en la Figura 5.24.Se observa que hasta 6 MHz, la DEP de Señal del Filtro, es mayor a la DEP de Señal de la impedancia característica en 2 dBm/Hz en promedio, después de 6 MHz, el comportamiento es similar.

NOTA: La DEP con y sin el Filtro en la carga derivada del Nodo C, se calcularon con el **Programa # 9** (Ver Anexo de programas).

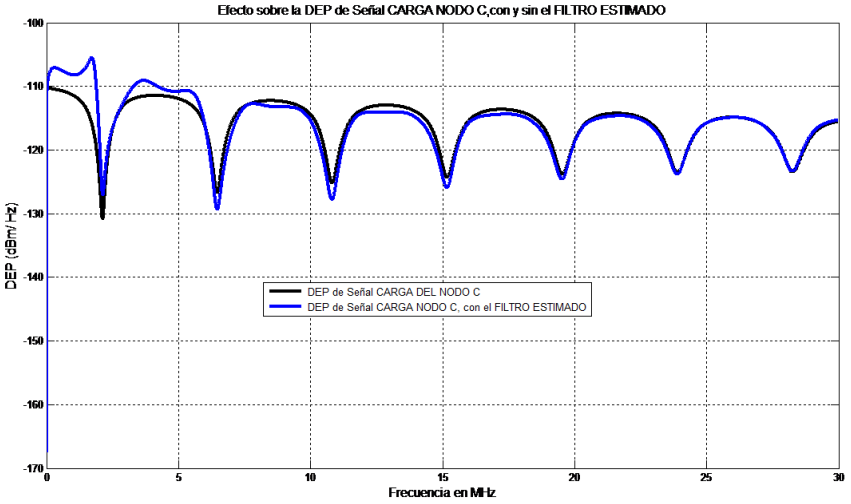


Figura 5.24: DEP de Señal en el canal establecido por la carga del Nodo C, con y sin el Filtro Red de 3 Nodos.

Fuente: el autor

5.4. Efecto de la DEP del Ruido en la Topología de 3 Nodos.

En este apartado, se aborda la Densidad Espectral del Ruido, para posteriormente junto con la DEP de Señal en el canal, analizar el efecto que produce el Filtro sobre la capacidad del canal que establece la carga del Nodo C.

El ruido que se presenta en redes BPL Hogareñas, se conoce como Ruido de Fondo Generalizado (GBN : Generalized Background Noise), [30], que es el que se aplica en este trabajo. Una muestra de la medición típica del ruido de fondo generalizado, con densidad espectral de potencia baja, se observa en la Figura 5.25.

El ruido de fondo generalizado, se encuentra parcialmente superpuesto con ruido de banda angosta,considerado como parte del GBN y se considera como la superposición del ruido de color de fondo (CBN : Color Background Noise) y los disturbios en el ancho de banda (NN : Narrowband Noise), se expresa por (5.47), así:

$$N_{GBN}(f) = N_{CBN}(f) + \sum_{j=fi}^{ff} (N_{NN}^{j}(j)) \tag{5.47}$$

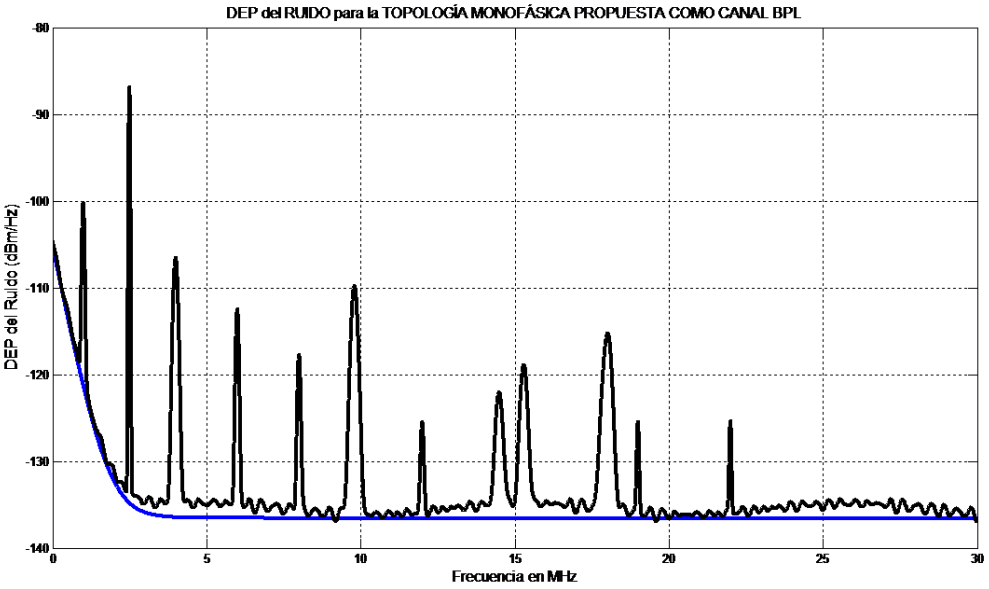


Figura 5.25: DEP del RUIDO considerada para la Topología Monofásica propuesta como canal BPL.

Fuente: el autor

Donde:

• N_{GBN}(f): densidad espectral de potencia del ruido de fondo generalizado

• N_{CBN}(f): densidad espectral de potencia del ruido de color de fondo

• N_{NN}(f): densidad espectral de potencia del ruido de producido por los disturbios en el ancho de banda

• K: Densidad espectral de potencia de la subcomponente K, generada por la interferencia k del ruido de ancho de banda.

La expresión para N_{CBN}(f), obtenido experimentalmente y para ambientes residenciales, se muestra en (5.48):

$$N_{CBN}(f) = -k_0 + k_0.e^{-\frac{f[MHz]}{3,6}}; [\frac{dB\mu V}{Hz}] \tag{5.48}$$

La aproximación para las interferencias de ancho de banda, utiliza la función Gaussiana, con los parámetros A_j de amplitud, fo,j frecuencia central, B_j el ancho de banda gaussiano. Su expresión aparece en (5.49):

$$N_{NN}^{k}(j) = A_j * e^{-\frac{(j-j_{o,j})^2[MHz]}{2B_j^2}}; [\frac{dB\mu V}{Hz}] \tag{5.49}$$

Utilizando las transformaciones adecuadas de unidades y aproximaciones necesarias y aplicando las expresiones (5.47), (5.48) y (5.49) se obtiene (5.50) que es la representación de la Densidad Espectral de Potencia del Ruido, que muestra la Figura 5.25, valor generalmente estimado entre 120 dBm/HZ y 140 dBm/HZ,la Tabla [5.2] muestra algunos valores característicos utilizados.

Tabla 5.2: Valores utilizados para el cálculo del Ruido Generalizado.

A_k	Desviación Estándar (σ)	Esperanza (μ)
1.597	0.0391	1
7.530	0.0220	2.5
0.203	0.0471	8.0
0.545	0.1025	9.8
0.098	0.1025	14.5
0.152	0.1030	15.3
0.067	0.0310	22

Fuente: elaboración propia

$$S_n(f) = log_{10}[[N_{CBN}(f) + \sum_{j=fi}^{ff}(N_{NN}^{j}(j)) + \sum_{j=fi}^{ff}(GAUSS(\mu_j, \sigma_j))] * \sum_{k=fi}^{ff}(\frac{C_k.sen(2k-1)}{(2k-1).\pi})]^2; [\frac{dBm}{Hz}] \tag{5.50}$$

$$S_n(f) = log_{10}[[-k_0 + k_0.e^{-\frac{f[MHz]}{3,6}} + \sum_{j=fi}^{ff}(A_j.e^{-\frac{(j-j_{o,j})^2[MHz]}{2B_j^2}}(j)) + \sum_{j=fi}^{ff} GAUSS(\mu_j, \sigma_j)] * \sum_{k=fi}^{ff}(\frac{C_k.sen(2k-1)}{(2k-1).\pi})]^2; [\frac{dBm}{Hz}]$$

NOTA: La DEP del RUIDO para la Topología Monofásica propuesta como canal BPL, se estimó con el **Programa # 10** (Ver Anexo de programas).

5.5. Capacidad del Canal que establece la carga del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos

El teorema de Shannon-Hartley es una aplicación del teorema de codificación para canales con ruido. Un caso muy frecuente es el de un canal de comunicación analógico continuo en el tiempo que presenta ruido.

La expresión para determinar la capacidad de canal viene dada por (5.51), que corresponde al caso dependiente de la frecuencia.

$$C = \int_{fi}^{ff} log_2(1 + \frac{S_r(f)}{S_n(f)}) \cdot df; B = ff - fi \tag{5.51}$$

Donde:

- C: capacidad del canal en bits por segundo (bps)
- B: ancho de banda del canal en Hz
- S_r(f): densidad espectral de potencia de la Señal recibida en dBm/Hz.
- S_n(f): densidad espectral de potencia de Ruido en dBm/Hz
- f : frecuencia en Hz

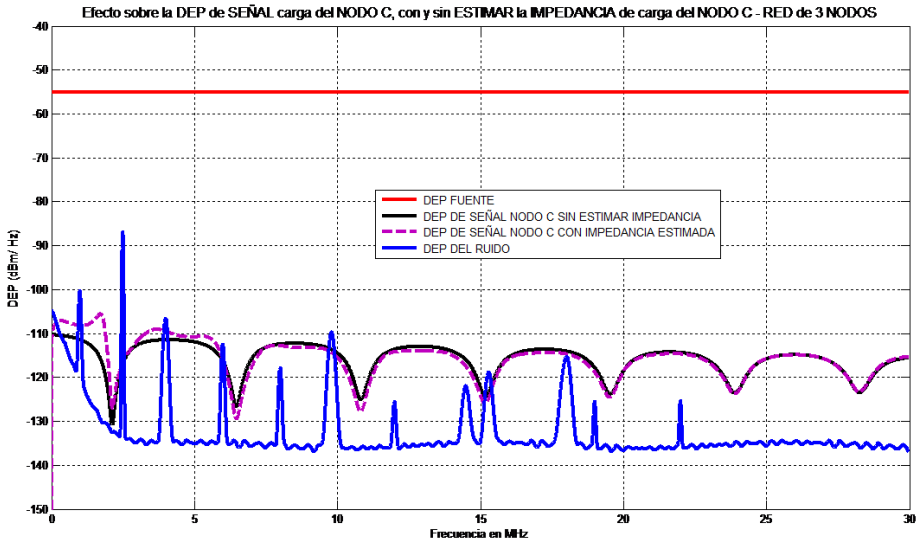


Figura 5.26: DEP recibida, ruido y relación SEŃAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

Ajustando la DEP de transmisión en -55 dBm/Hz [28], que se presenta a $Vfuente_{BPL} = 3.5\,\%$ VT_x y asegura una potencia de transmisión de 5 mW. El escenario para obtener la capacidad de canal que establece la carga derivada del Nodo C, con y sin Filtro parte de la Figura 5.26.

Si se considera que la técnica de transmisión adoptada para sistemas BPL hogareña es OFDM, en el dominio de la frecuencia se tendrán N componentes de frecuencia discretos en un intervalo de frecuencia,por tanto se puede considerar que el canal presenta una respuesta como un conjunto sucesivo de estados LTI (Linear Time Invariant) lineales e invariantes en el tiempo que aparecen periódicamente, por tanto se emplea una generalización de la fórmula de Shannon, para un modelo de canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia [31], [32].

El modelo aplicado para estimar la capacidad de canal, comprende los siguientes pasos:

1. Canal invariante en el tiempo, canal con respuesta en frecuencia $H_{CANAL}(f)$ conocida - en el transmisor y en el receptor- y potencia de transmisión **S**, como aparece en la Figura 5.27.

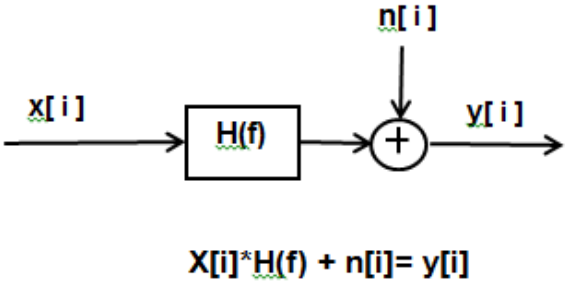


Figura 5.27: Modelo de Canal. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

2. Conocida $H_{CANAL}(f)$ (5.24), (5.31), (5.42),se divide el canal que establece la carga derivada del Nodo C, en subcanales (C_1,C_2,C_3) de ancho de banda **B**,Figura 5.28.

La SNR_k y la potencia localizada $S_k(f)$ en cada canal (5.52) y la capacidad de canal de cada canal (5.53). En la Figura 5.29, como verificación intermedia [en forma y tamańo], aparece la función de transferencia del canal del backbone, con y sin el Filtro estimado.

$$SNR_k = \frac{|H_k(f)|^2 * S_k(f)}{S_n(f)}; \tag{5.52}$$

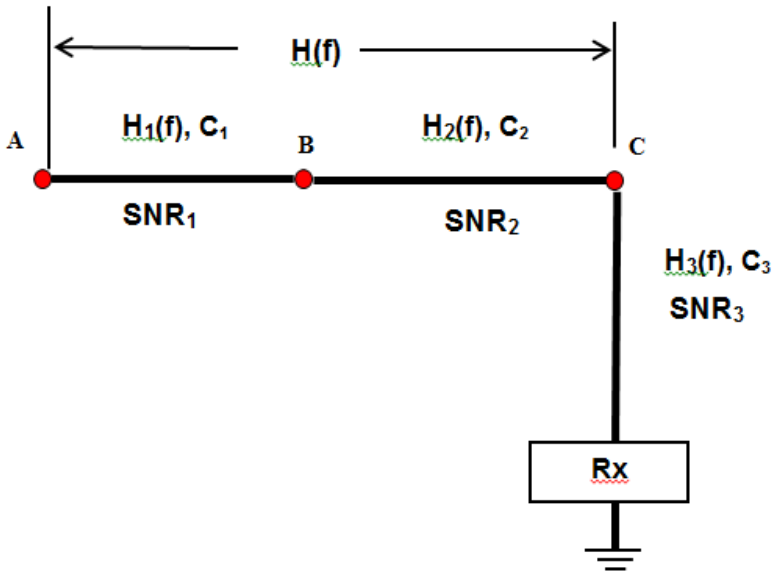


Figura 5.28: Subcanales (C_1,C_2,C_3), asociados al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

$$C_k = B * log_2[1 + \frac{|H_k(f)|^2 * S_k(f)}{S_n(f)}] \tag{5.53}$$

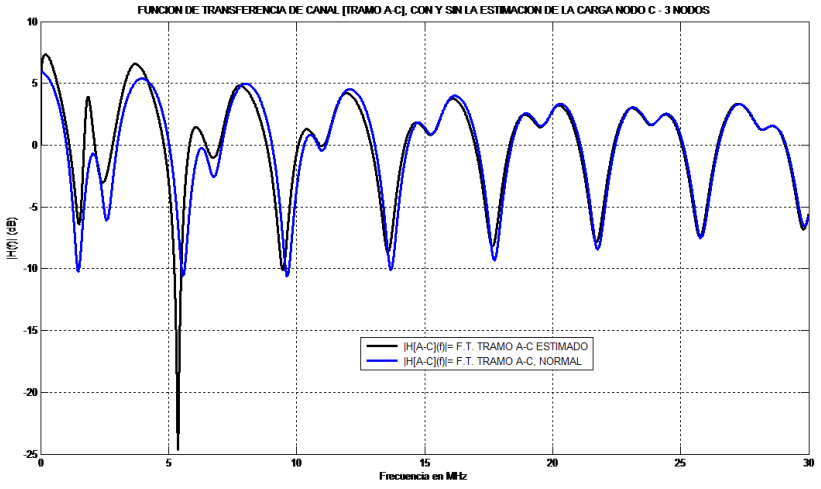


Figura 5.29: Función de Transferencia del canal asociado al backbone, con y sin el Filtro estimado. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

3. Como se tienen varios canales, es necesario maximizar la capacidad de canal, sujeta a la potencia de transmisión **S**, ecuación (5.54).

$$C_{MÁX} = \sum_{k=1}^{N}(B * log_2[1 + \frac{|H_k(f_k)|^2 * S_k(f_k)}{S_n(f_k)}]); \quad sujeto\ a: \quad \sum_{k=1}^{N}(S_k) < \mathbf{S} \tag{5.54}$$

La expresión (5.54), se transforma para el caso específico de mediciones en redes BPL en (5.55), [33]. La FCC sugiere Δf =9.6 KHz.

$$C = \Delta f * \sum_{k=1}^{N}(log_2[1 + \frac{|H(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)}]); \quad (bps) \tag{5.55}$$

Donde:

$|H(f_k)|^2$, es la DEP de Señal de la carga derivada del Nodo C;$S_t(f_k)$ la potencia de transmisión;$S_n(f_k)$, la DEP del Ruido, cada una evaluada para los N componentes de frecuencia discretos.

De (5.55) se obtiene la relación Señal a Ruido (5.56) en el canal que establece la carga derivada del Nodo C, la Figura 5.30 muestra la relación Señal a Ruido con y sin el Filtro estimado, para el canal de la carga derivada del Nodo C.

$$SNR_k = 10 * log_{10}[1 + \frac{|H(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)}]; \quad (dB) \tag{5.56}$$

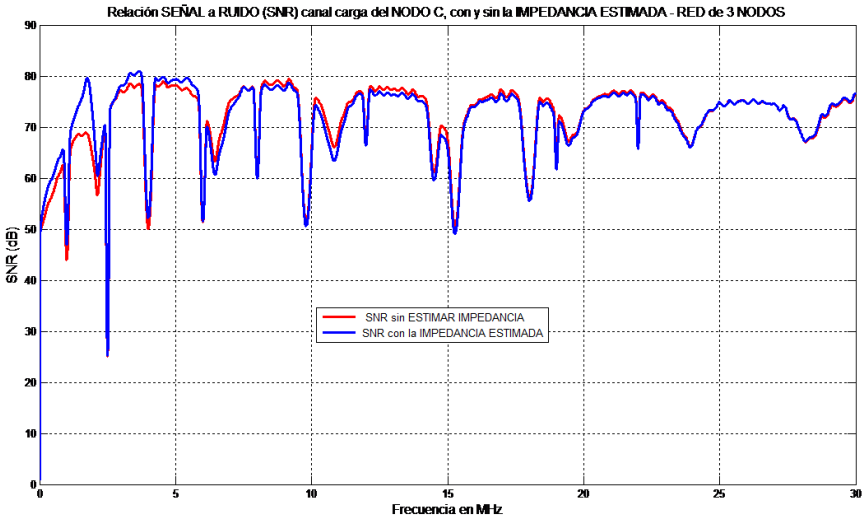


Figura 5.30: Relación Señal a Ruido en el Canal que establece la carga derivada del Nodo C, con y sin el Filtro. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

La Tabla [5.3],muestra el resumen de resultados para el promedio de la relación Señal a Ruido y la Tabla [5.4] la capacidad de canal, en el canal que establece la carga derivada del Nodo C con y sin el Filtro, ajustando la DEP de transmisión entre -52 dBm/Hz y -60 dBm/Hz.

Tabla 5.3: Resumen: Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo C, con y sin el Filtro.Topología de 3 nodos.

DEP de TRANSMISIÓN [dBm/Hz]	SNR SIN FILTRO [dB]	SNR CON FILTRO [dB]	VARIACIÓN [dB]	VARIACIÓN [%]
- 60	67.00	67.02	0.0177	0.03
- 58	68.92	68.94	0.0177	0.03
-57.50	70.49	70.51	0.0177	0.03
-55	71.82	71.83	0.0176	0.02
-52	74.59	74.61	0.0176	0.02

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.4: Resumen: Capacidad de Canal en la carga derivada Nodo C, con y sin el Filtro.Topología de 3 nodos.

DEP de TRANSMISIÓN [dBm/Hz]	CAPACIDAD de CANAL SIN FILTRO [Mbps]	CAPACIDAD DE CANAL CON FILTRO [Mbps]	VARIACIÓN [Mbps]	VARIACIÓN [%]
- 60	213.67	213.72	0.050	0.0234
- 58	219.78	219.84	0.060	0.0273
-57.50	224.80	224.86	0.060	0.0267
-55	229.03	229.08	0.050	0.0218
-52	237.88	237.94	0.060	0.0252

Fuente: elaboración propia

Los resultados de las Tablas [5.3] y [5.4], muestran que utilizando el Filtro en la carga derivada del Nodo C - para las mismas condiciones de transmisión -:la Relación Señal a Ruido experimenta un aumento en promedio del 0.03 % equivalente a 0.0177 dB y la capacidad de canal experimenta un aumento relativo del 0.0249 % equivalente a 0.056 Mbps.

NOTAS:

-La DEP recibida, ruido y relación SEÑAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo C, con y sin el Filtro, se estimó con el **Programa # 11** (Ver Anexo de programas).

-La Función de Transferencia del canal asociado al Backbone con y sin el Filtro, se calculó con el **Programa # 12** (Ver Anexo de programas).

- La Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo C, se calculó con el **Programa # 13** (Ver Anexo de programas).

5.6. Funciones de transferencia, topología de 5 Nodos

Una vez validados los resultados para la topología de 3 Nodos [1] y aplicando el mismo procedimiento de la sección 5.3, se obtienen un grupo de 5 funciones de transferencia, que caracterizan los canales asociados a la topología sugerida para 5 nodos.

Los resultados obtenidos, se logran, aplicando la simulación propuesta sobre el sistema (4.34), obtenido de la topología Figura 2.4, sobre las expresiones (5.15),(5.16),(5.17),(5.18) y (5.19), para los conductores A (10 mm^2) y B (25 mm^2).

En las Figuras 5.31,5.32,5.33, 5.34 y 5.35, se muestran los resultados obtenidos de la simulación en los canales asociados a las cargas derivadas correspondientes. La Figura 5.36 muestra la representación en conjunto de las funciones de transferencia asociadas a los canales de las cargas derivadas de los Nodos B, C,D y E, en función de la frecuencia.

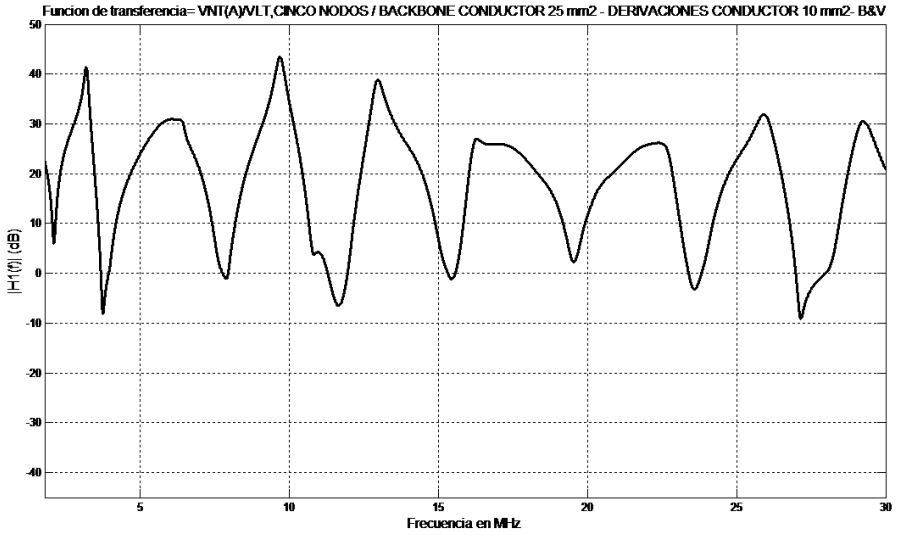


Figura 5.31: Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

El modelo que se utiliza en este estudio, para el análisis del comportamiento de las funciones de transferencia en función de la frecuencia, es el valor medio geométrico, que se desarrolla en la siguiente sección.

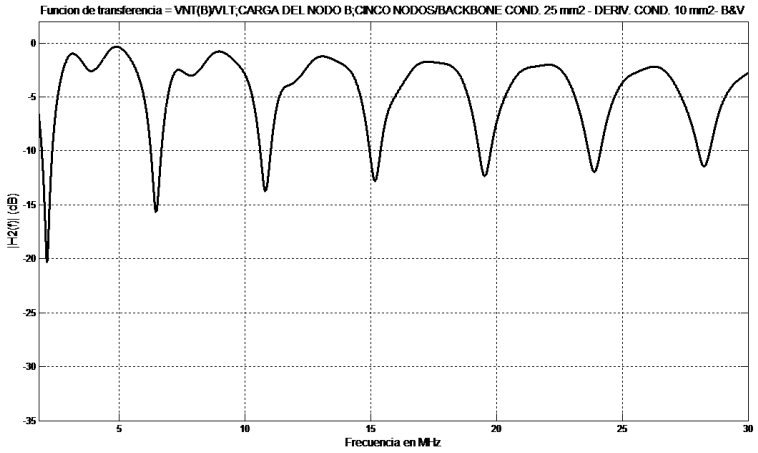


Figura 5.32: Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Red de 5 Nodos

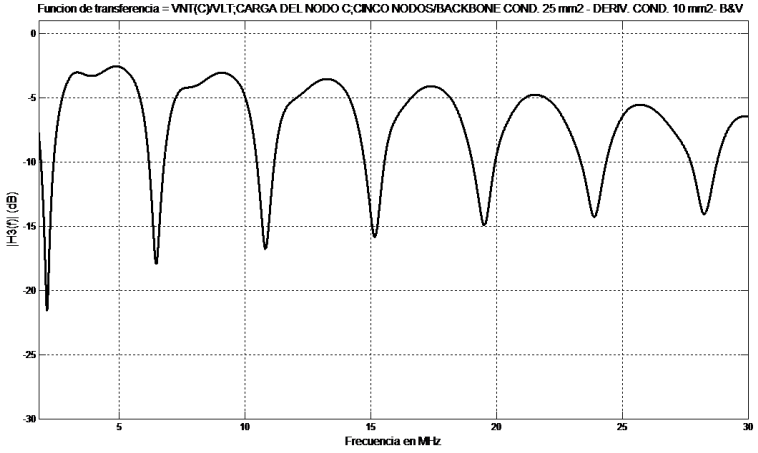


Figura 5.33: Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Red de 5 Nodos

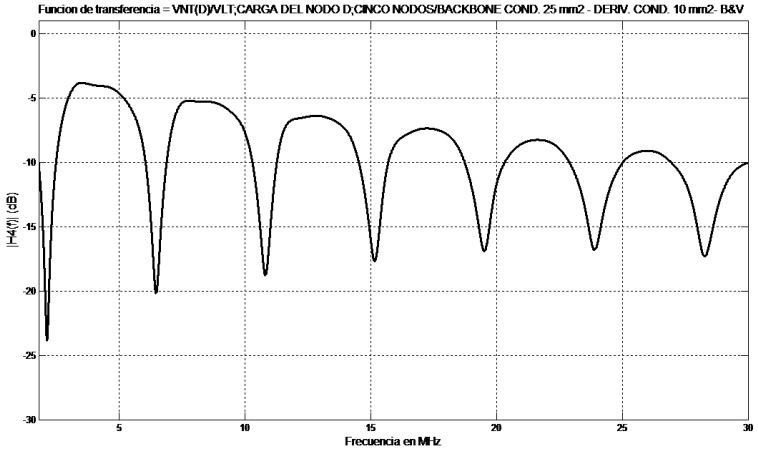


Figura 5.34: Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{VS}$).Red de 5 Nodos

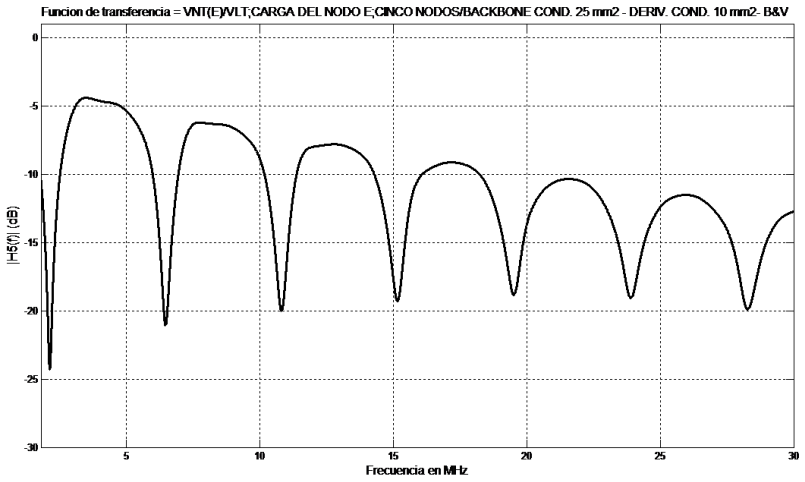


Figura 5.35: Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VS}$).Red de 5 Nodos

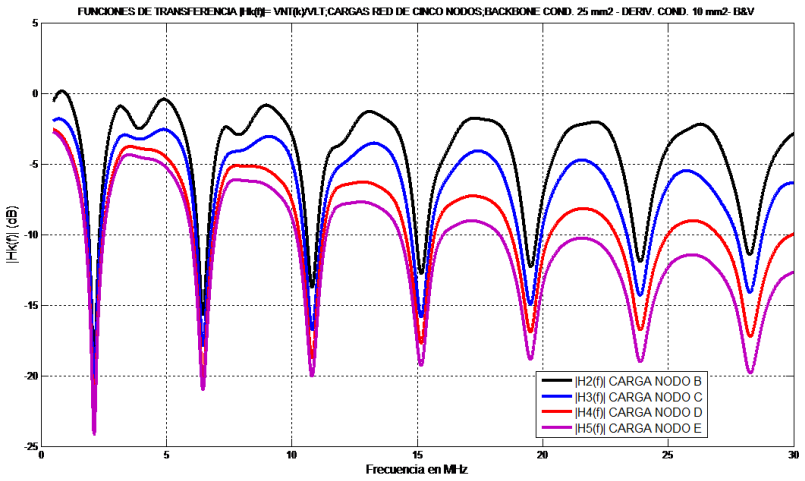


Figura 5.36: Funciones de Transferencia $|H_k(f)|$= H($\frac{Vk}{VS}$).Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

NOTA: Las Funciones de Transferencia, se hallaron con el **Programa # 14** (Ver Anexo de programas).

5.6.1. Valor medio geométrico de las Funciones de transferencia, topología para 5 Nodos

Para determinar los filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas de la topología para 5 nodos, se utilizó el procedimiento propuesto en la sección 5.3.1.

Se aclara, que el valor medio geométrico para funciones no lineales periódicas, en algunas ocasiones, se asume como la envolvente (inferior o superior) de la función o como la envolvente trasladada a un lugar que represente el valor medio. Para la mayoría de las funciones de transferencia encontradas en este estudio, se utiliza la envolvente superior. La Figura 5.42 muestra el procedimiento utilizado para hallar el valor medio geométrico y las características del filtro asociado a la función de transferencia del canal que establece la carga del Nodo E.

En las Figuras 5.37, 5.38, 5.39,5.40 y 5.41, aparecen los resultados obtenidos para el valor medio geométrico de las funciones de transferencia de los canales asociados a las cargas derivadas, en función de la frecuencia y la Tabla 5.5, muestra el resumen sobre las funciones de transferencia.

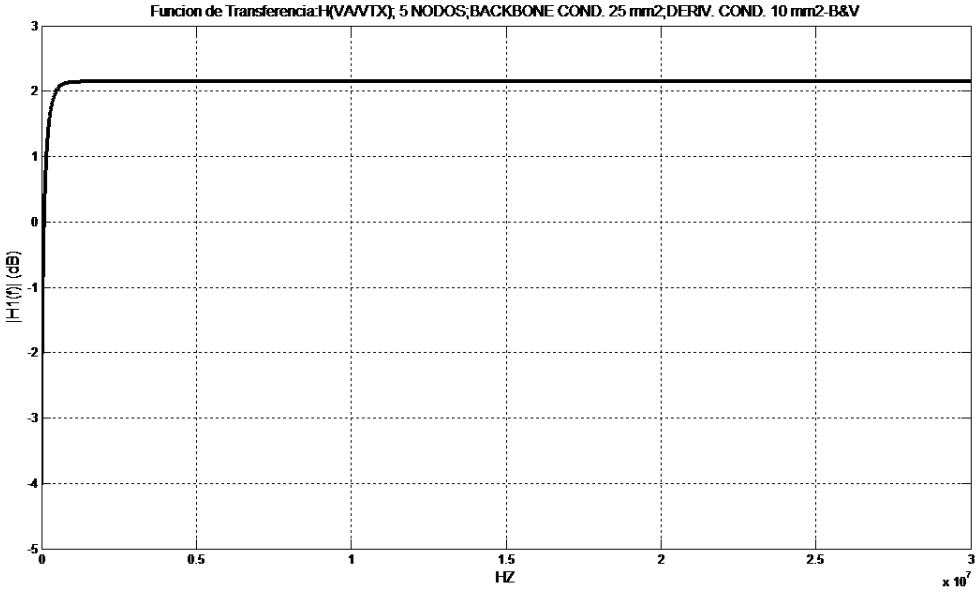


Figura 5.37: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{VS}$).Figura 5.31. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

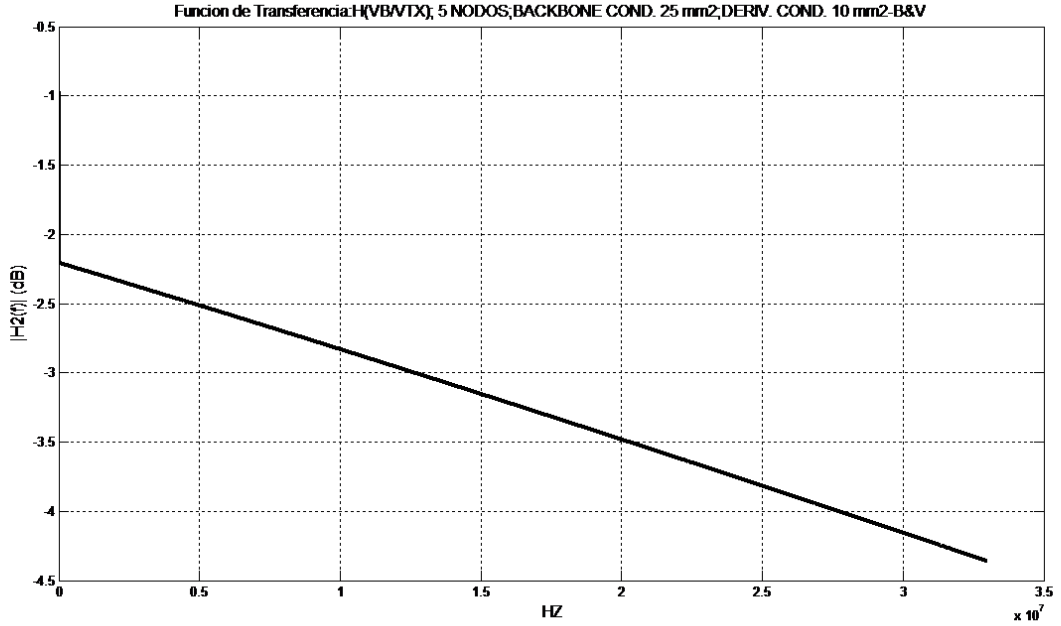


Figura 5.38: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{VS}$).Figura 5.32. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

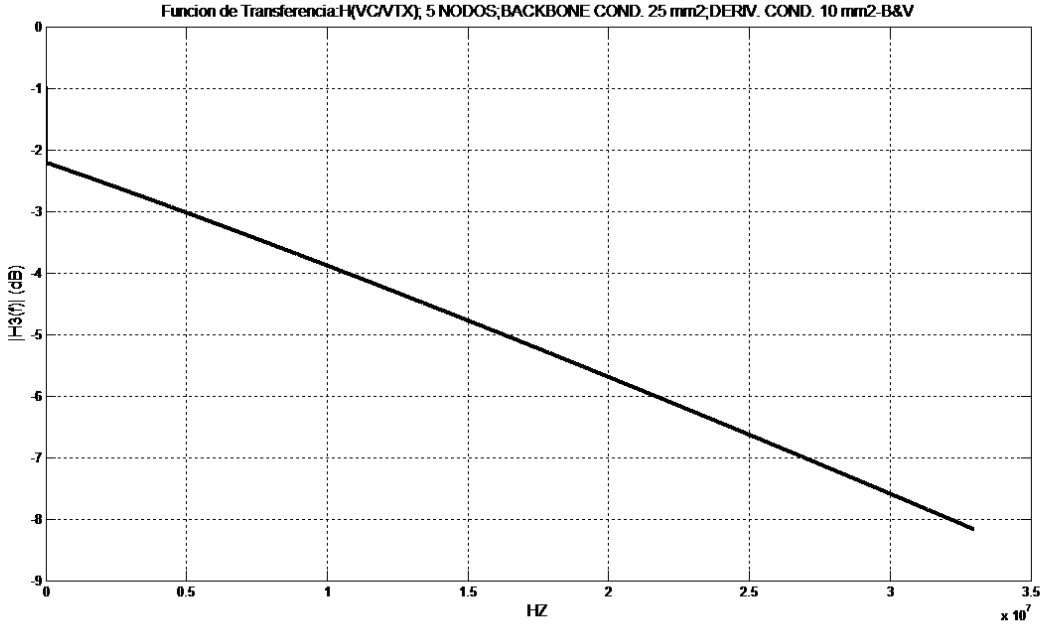


Figura 5.39: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{VS}$).Figura 5.33. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

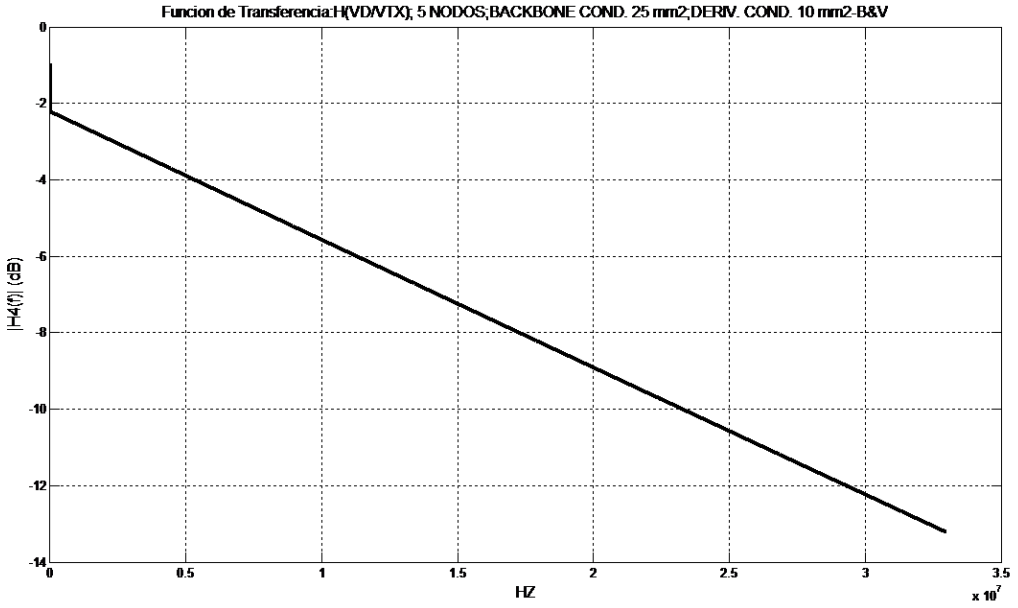


Figura 5.40: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{VS}$).Figura 5.34. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

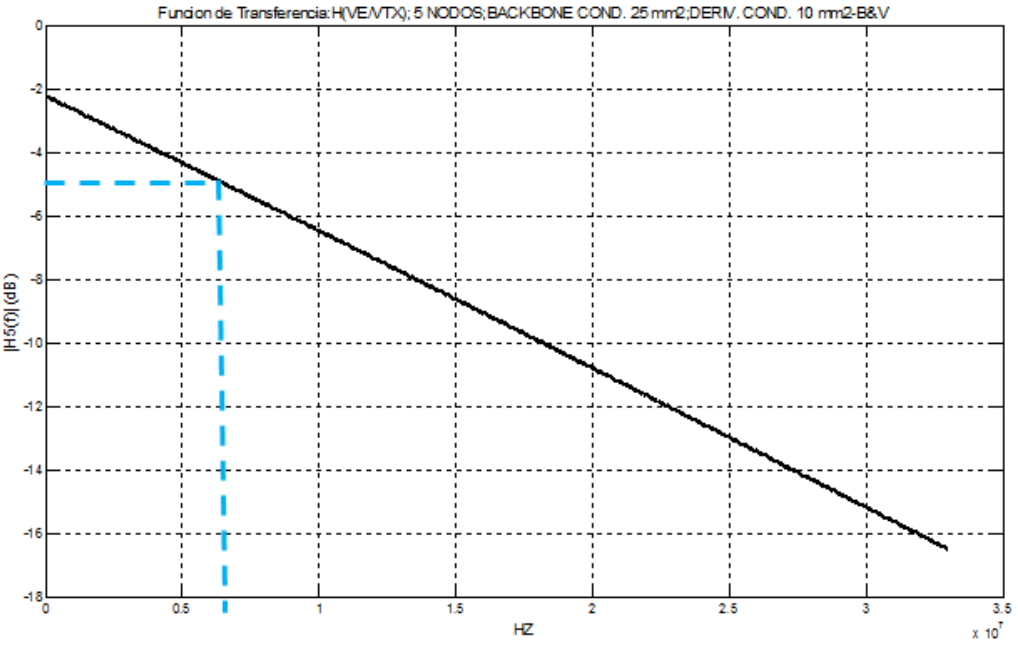


Figura 5.41: Valor medio geométrico de la Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VS}$).Figura 5.35. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

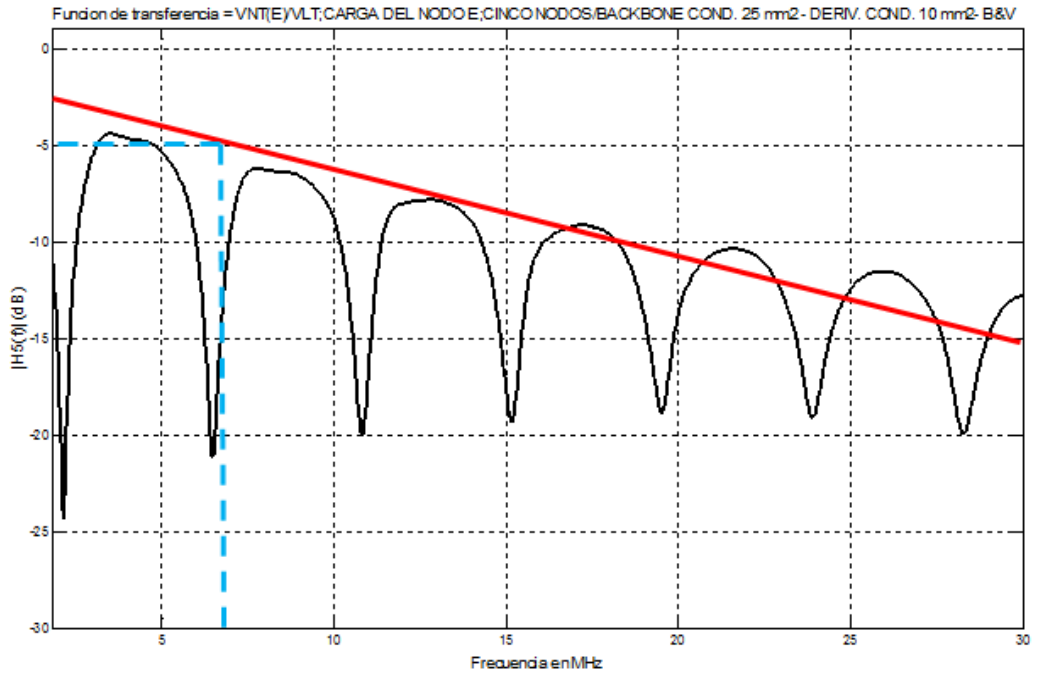


Figura 5.42: Interpretación del valor medio geométrico para la Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{VTS}$). Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

Tabla 5.5: Resumen: Funciones de Transferencia topología de 5 nodos.

CARGA DEL NODO	TIPO DE FILTRO ENCONTRADO	ATENUACIÓN A 30 MHz (dB)	FRECUENCIA DE CORTE A -3 dB (MHz)	MAGNITUD (dB/década)
A	Pasa-Alto	+2.0	1	40
B	Pasa-Bajo	-5.0	30	40
C	Pasa-Bajo	-7.8	16.50	40
D	Pasa-Bajo	-12.2	8.2	40
E	Pasa-Bajo	-15.1	7	40

Fuente: elaboración propia

La Tabla [5.5], muestra que el canal que establece la carga derivada del Nodo E, experimenta el comportamiento de un filtro pasa-bajo, tiene la mayor atenuación a 30 MHz (-15.10 dB) y la menor frecuencia de corte a - 3 dB (7.0 MHz),elementos suficientes para el diseño del Filtro asociado a este canal.

5.6.2. Características de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas en la topología de 5 Nodos

Siguiendo con el método validado en la sección 5.3.2, se aplican los mismos procedimientos en la topología de 5 Nodos. Las funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia, iteradas mediante métodos numéricos [18] se presentan en las ecuaciones (5.57), (5.58),(5.59),(5.60) y (5.61). Los diagramas de Bode correspondientes, aparecen en las Figuras 5.43, 5.44, 5.45, 5.46 y 5.47, se estimó un error en amplitud del 5 %. La Familia de diagramas de Bode,se observa en la Figura 5.53.

El resultado del algoritmo para determinar los elementos del filtro asociado al canal de la carga derivada correspondiente, aparecen en las Figuras 5.48, 5.49, 5.50, 5.51 y 5.52. Las redes de los Filtro pasivos asociados al canal que establecen las cargas derivadas correspondientes,se muestran en las Figuras 5.54,5.55,5.56,5.57 y 5.58.

La Tabla [5.6] muestra el resumen respecto de los elementos que componen los Filtros pasabajos asociados al canal que establecen las cargas derivadas de los Nodos B, C, D y E.

$$H_1(f)_{5Nodos} = H_1(\frac{V_A}{VT_s}) = \frac{15{,}5S^2 + 18300381{,}956S + 1}{7S^2 + 8611944{,}45S + 1{,}751} \tag{5.57}$$

$$H_2(f)_{5Nodos} = H_2(\frac{V_B}{VT_s}) = \frac{3{,}047S^2 + 113945766{,}208S + 0{,}762}{7S^2 + 158926412{,}50S + 1} \tag{5.58}$$

$$H_3(f)_{5Nodos} = H_3(\frac{V_C}{VT_s}) = \frac{3{,}047S^2 + 68238809{,}878S + 0{,}762}{8{,}121S^2 + 95176412{,}500S + 1} \tag{5.59}$$

$$H_4(f)_{5Nodos} = H_4(\frac{V_D}{VT_s}) = \frac{3{,}047S^2 + 149292479{,}103S + 0{,}762}{16{,}121S^2 + 208226412{,}500S + 1} \tag{5.60}$$

$$H_5(f)_{5Nodos} = H_5(\frac{V_E}{Vs_x}) = \frac{2{,}70e^{-27}\ S^2 + 3{,}12e^{-13}\ S + 1{,}06e^{-1}}{2{,}82e^{-26}\ S^2 + 3{,}17e^{-12}\ S + 1{,}00} \tag{5.61}$$

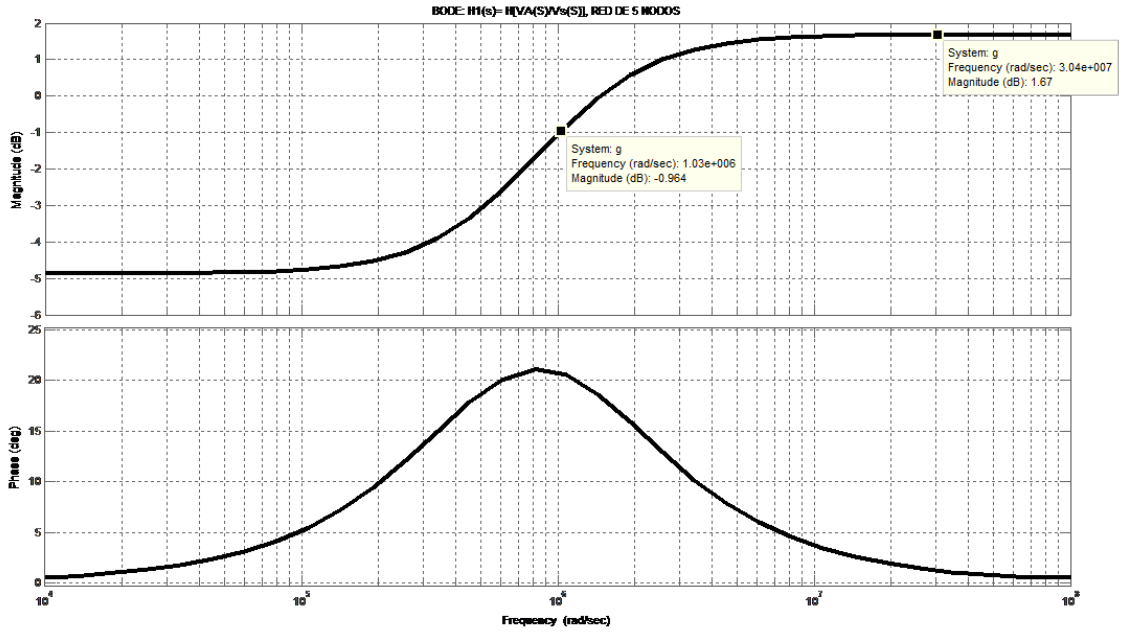


Figura 5.43: Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vs}$). Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

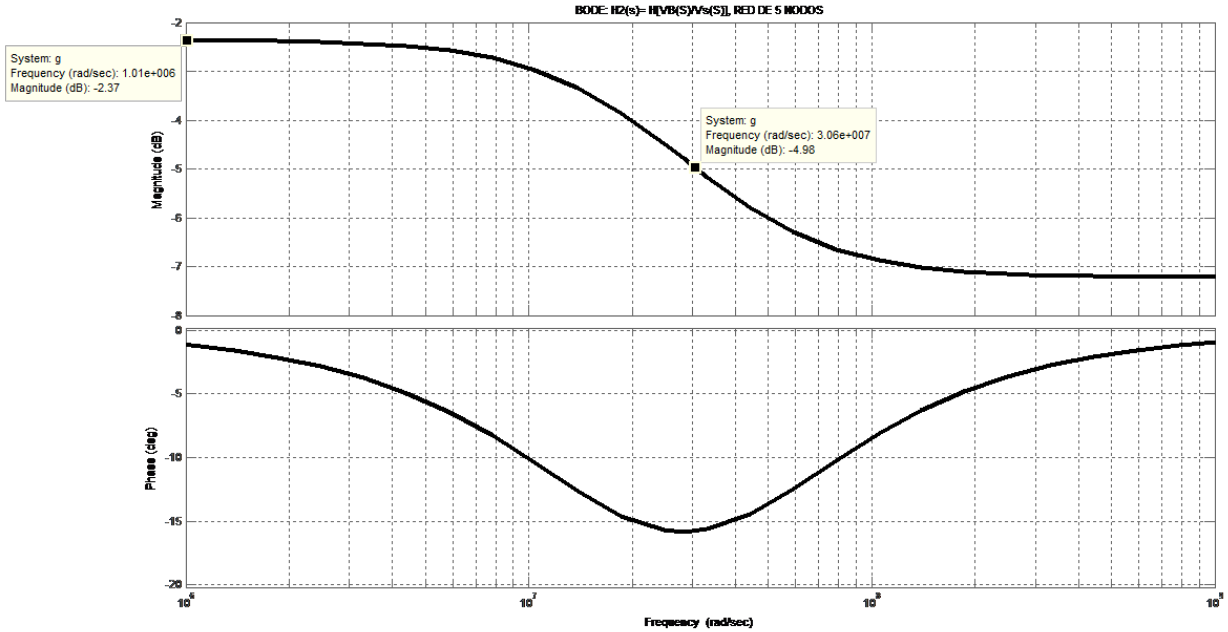


Figura 5.44: Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vs}$). Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

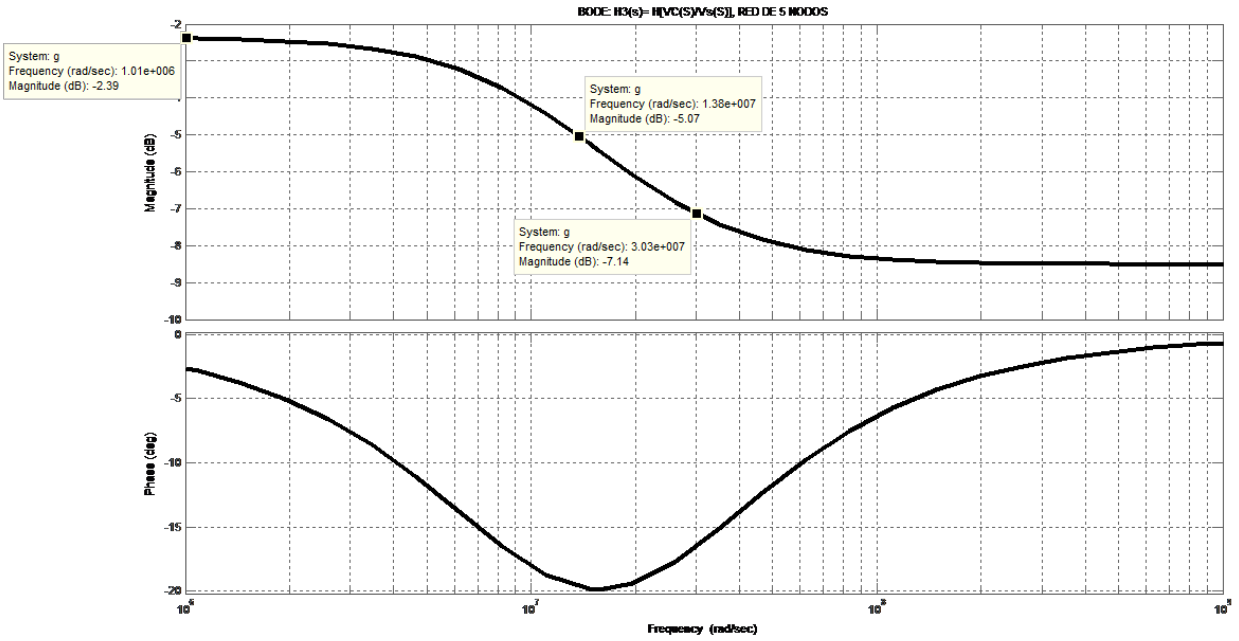


Figura 5.45: Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vs}$). Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

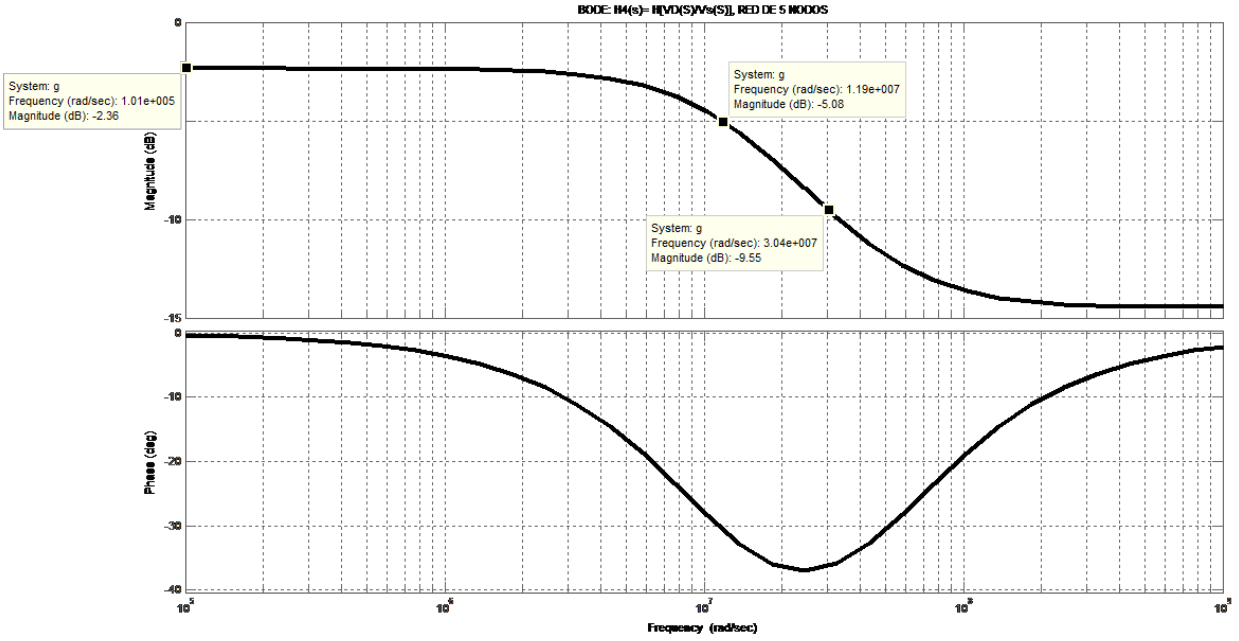


Figura 5.46: Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{Vs}$). Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

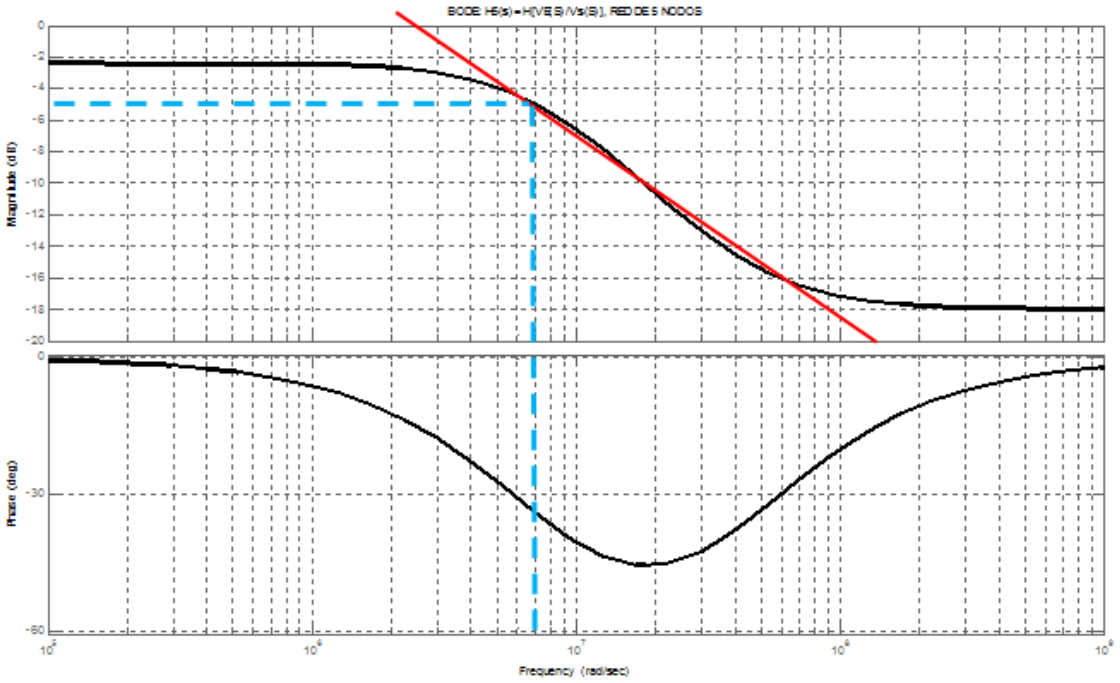


Figura 5.47: Diagrama de Bode Función de Transferencia $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{Vs}$). Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

MODELO: SEGUNDA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN CERO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 5 NODOS / NODO A

K	S^1	S^2		K	S^1	S^2	F.D.
1,00	18300381,96	15,50	0,00	1,75	8611944,45	7,00	-0,571
-1,00	-4917800,00	-4,00	0,00				
0,00	13382581,96	11,50	0,00	0,00	13382581,96	11,50	-0,000000131
1,75	8611944,45	7,00	0,00				
-1,75	-0,000001505	0,00	0,00	0,00	8611944,45	7,00	-1,554
0,00	8611944,45	7,00	0,00				
0,00	13382581,96	11,50	0,00	0,00	0,00	0,61	-14003508,144
	-13382581,96	-10,89	0,00				
	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	7,00	-0,088
	8611944,45	7,00	0,00				
	-8611944,45	0,00	0,00				
	0,00	7,00	0,00				
		0,61	0,00				
		-0,61	0,00				
		0,00	0,00				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Y1(S)	0,571	0,000000000000	0,571		Ω
Z2(S)	0,000	0,000000130855		0,131	µF
Y3(S)	1,554	0,000000000000	1,554		Ω
Z4(S)	0,000	0,000000071411		0,071	µF
Y5(S)	0,088	0,000000000000	0,088		Ω

Figura 5.48: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 2 sobre $|H_1(f)|$= H($\frac{VA}{Vs}$). Nodo A - Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 5 NODOS / NODO B

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K	F.D.
3,047	113945766,208	0,762	0,000	7,000	158926412,500	1,000	-0,435
-3,047	-69181358,055	-0,435	0,000				
0,000	44764408,153	0,326	0,000	0,000	44764408,153	0,326	-0,000000156
7,000	158926412,500	1,000	0,000				
-7,000	-0,00000005105	0,000	0,000	0,000	158926412,500	1,000	-0,282
0,000	158926412,500	1,000	0,000				
0,000	44764408,153	0,326	0,000	0,000	0,0000000000	0,045	-564234078,639
	-44764408,153	-0,282	0,000				
	0,000	0,045	0,000	0,000	158926412,500	1,000	-3,550
	158926412,500	1,000	0,000				
	0,000	0,000	0,000				
	158926412,500	1,000	0,000				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,435	0,0000000000	0,435		Ω
Y2(S)	0,000	0,0000001564		0,156	µF
Z3(S)	0,282	0,0000000000	0,282		Ω
Y4(S)	0,000	0,0000000018		0,002	µF
Z5(S)	3,550	0,0000000000	3,550		Ω

Figura 5.49: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_2(f)|$= H($\frac{VB}{Vs}$). Nodo B - Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 5 NODOS / NODO C

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K	F.D.
3,047	68238809,878	0,762	0,000	8,121	95176412,500	1,000	-0,375
-3,047	-35711938,993	-0,375	0,000				
0,000	32526870,886	0,387	0,000	0,000	32526870,886	0,387	-0,000000250
8,121	95176412,500	1,000	0,000				
-8,121	-0,0000000965	0,000	0,000	0,000	95176412,500	1,000	-0,342
0,000	95176412,500	1,000	0,000				
0,000	32526870,886	0,387	0,000	0,000	0,000	0,045	-278494341,744
	-32526870,886	-0,342	0,000				
	0,000	0,045	0,000	0,000	95176412,500	1,000	-2,926
	95176412,500	1,000	0,000				
	0,000	0,000	0,000				
	95176412,500	1,000	0,000				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,375	0,0000000000	0,375		Ω
Y2(S)	0,000	0,0000002497		0,250	µF
Z3(S)	0,342	0,0000000000	0,342		Ω
Y4(S)	0,000	0,0000000036		0,004	µF
Z5(S)	2,926	0,0000000000	2,926		Ω

Figura 5.50: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_3(f)|$= H($\frac{VC}{Vs}$). Nodo C - Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN / TOPOLOGÍA 5 NODOS / NODO D

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K	F.D.
3,047	149292479,103	0,762	0,000	16,121	208226412,500	1,000	-0,189
-3,047	-39358285,828	-0,189	0,000				
0,000	109934193,275	0,573	0,000	0,000	109934193,275	0,573	-0,000000147
16,121	208226412,500	1,000	0,000				
-16,121	0,000	0,000	0,000	0,000	208226412,500	1,000	-0,528
0,000	208226412,500	1,000	0,000				
0,000	109934193,275	0,573	0,000	0,000	0,000	0,045	-394401755,913
	-109934193,275	-0,528	0,000				
	0,000	0,045	0,000	0,000	208226412,500	1,000	-1,894
	208226412,500	1,000	0,000				
	0,000	0,000	0,000				
	208226412,500	1,000	0,000				

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,189	0,0000000000	0,189		Ω
Y2(S)	0,000	0,0000001466		0,147	µF
Z3(S)	0,528	0,0000000000	0,528		Ω
Y4(S)	0,000	0,0000000025		0,003	µF
Z5(S)	1,894	0,0000000000	1,894		Ω

Figura 5.51: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_4(f)|$= H($\frac{VD}{Vs}$). Nodo D - Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

MODELO: PRIMERA FORMA CAWER [GRADO 2 SOBRE GRADO 2] / EXTRACCIONES ALTERNADAS DE CONSTANTE Y POLO EN INFINITO CON INVERSIÓN. FILTRO CARGA NODO E

S^2	S^1	K		S^2	S^1	K
2,71E-27	3,12E-13	1,06E-01	0,00E+00	2,82E-26	3,17E-12	1,00
-2,71E-27	-3,05E-13	-9,64E-02	0,00E+00			
0,00E+00	6,66E-15	9,86E-03	0,00E+00	0,00E+00	6,66E-15	9,86E-03
2,82E-26	3,17E-12	1,00E+00	0,00E+00			
-2,82E-26	-4,17E-14	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,13E-12	1,00E+00
0,00E+00	3,13E-12	1,00E+00	0,00E+00			
0,00E+00	6,66E-15	9,86E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-03
	-6,66E-15	-2,13E-03	0,00E+00			
	0,00E+00	7,73E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00
	3,13E-12	1,00E+00	0,00E+00			
	-3,13E-12	0,00E+00	0,00E+00			
	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00			
		7,73E-03	0,00E+00			
		-7,73E-03	0,00E+00			
		0,00E+00	0,00E+00			

VALORES REALES: ELEMENTOS OBTENIDOS PARA LA RED ESCALERA

Y(S) ó Z(S)	R	C	R	C	UNIDADES
Z1(S)	0,0964	0,00E+00	0,0964		Ω
Y2(S)	0,0000	4,23E-12		4,23	pF
Z3(S)	0,0021	0,00E+00	0,0021		Ω
Y4(S)	0,0000	4,05E-10		404,54	pF
Z5(S)	0,0077	0,00E+00	0,0077		Ω

Figura 5.52: Resultado del algoritmo - Modelo Cawer 1 sobre $|H_5(f)|$= H($\frac{VE}{Vs}$). Nodo E - Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

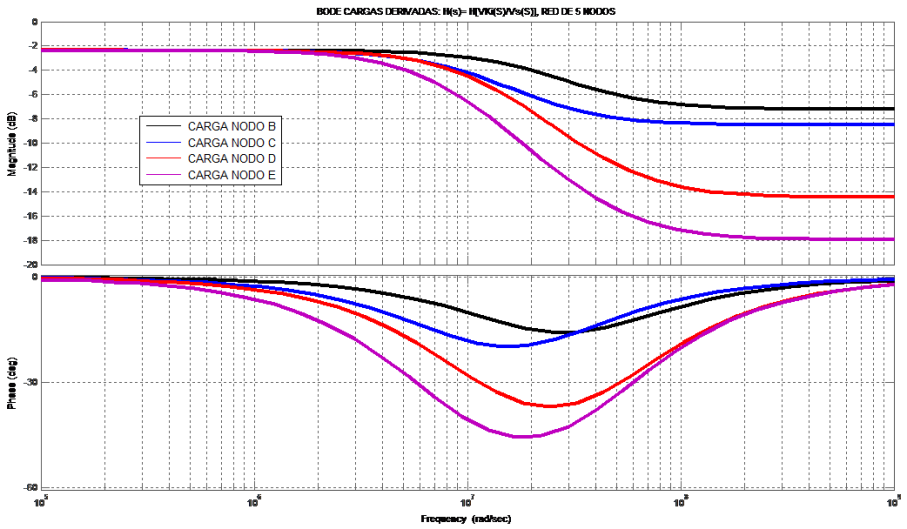


Figura 5.53: Diagrama de Bode Funciones de Transferencia asociadas a los canales de las cargas derivadas. $|H_k(f)|$= H($\frac{Vk}{Vs}$). Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

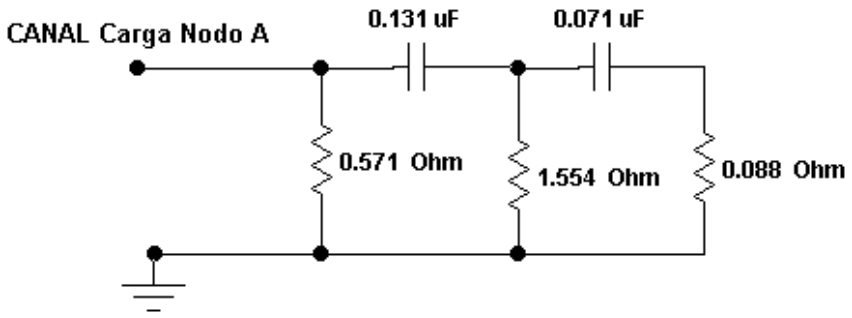


Figura 5.54: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo A. Red de 5 Nodos

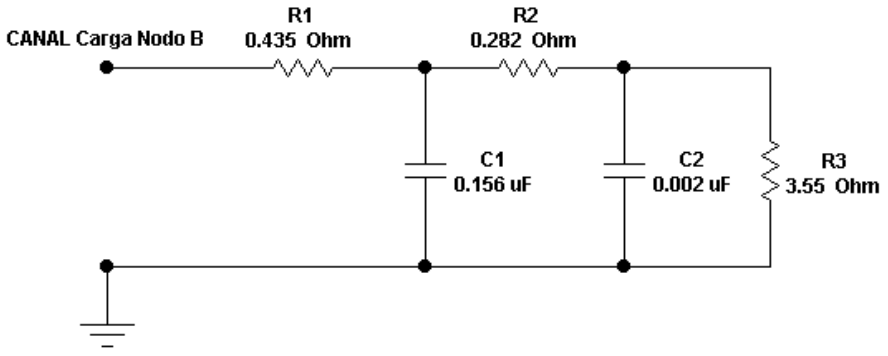


Figura 5.55: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo B. Red de 5 Nodos

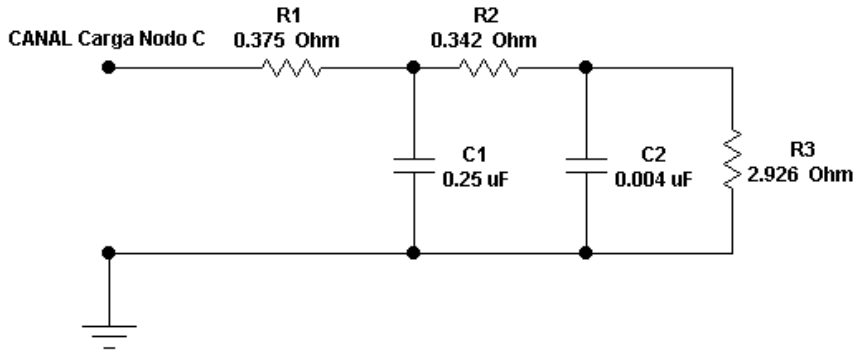


Figura 5.56: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo C. Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

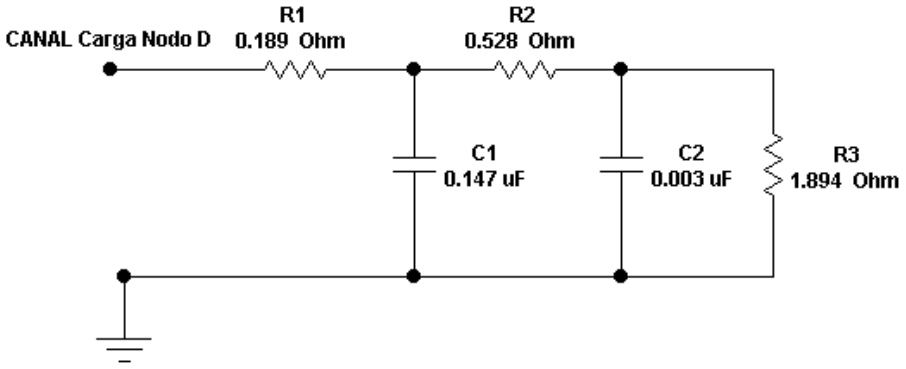


Figura 5.57: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo D. Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

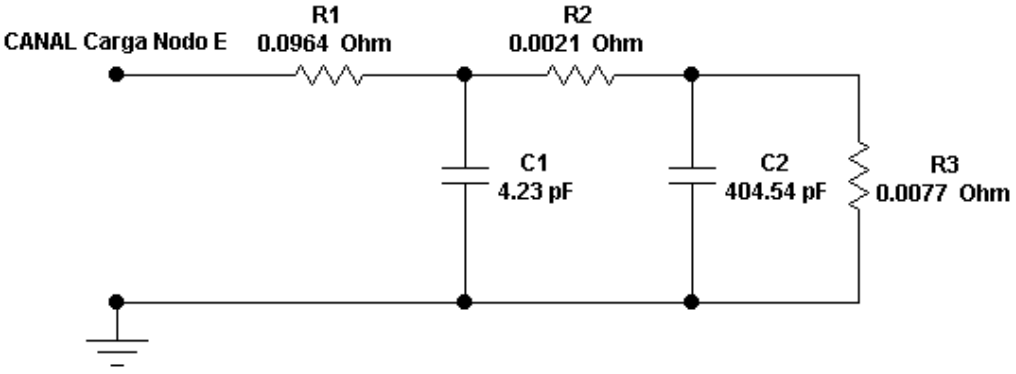


Figura 5.58: Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

Tabla 5.6: Resumen: Elementos de los Filtros Asociados a los canales que establecen las cargas derivadas. Topología de 5 nodos.

CARGA DEL NODO	R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)	C1(μF)	C2(μF)	TIPO DE IMPEDANCIA
B	0.435	0.282	3.550	0.156	0.002	CAPACITIVA
C	0.375	0.342	2.926	0.250	0.004	CAPACITIVA
D	0.189	0.528	1.894	0.147	0.003	CAPACITIVA
E	0.096	0.0021	0.0077	4,23e^{-}6	4,05e^{-}4	CAPACITIVA

Fuente: elaboración propia

5.6.3. Verificación del Filtro asociado al canal que establece la carga del Nodo E. Topología de 5 Nodos

Con el procedimiento utilizado en la sección 5.3.3, se verifica el efecto que produce sobre la función de transferencia del canal asociado a la carga derivada del Nodo E, reemplazar esta carga derivada [impedancia característica], por la red del Filtro estimado Figura 5.58. Se escoge esta carga derivada, porque es la más alejada de la fuente BPL y presenta el mayor canal, el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se determina la impedancia del Filtro $Z_{Rfiltro}$, utilizando los valores de los elementos de la Red Figura 5.58 y asociando un grupo de constantes, como se muestra en Figura 5.59, para determinar las relaciones (5.62) y (5.63).

$$Z_{RFiltro}(f)_{5Nodos} = \frac{d10.(j\omega)^2 + d13.(j\omega) + d8}{d17.(j\omega)^2 + d18.(j\omega) + 1} \tag{5.62}$$

$$Z_{RFiltro}(f)_{5Nodos} = \frac{(d8 - d10.\omega^2) + (j\omega)d13}{(1 - d13.\omega)^2 + (j\omega)d18} \tag{5.63}$$

FILTRO ESTIMADO CANAL CARGA NODO E

R1= 0,0964	Ω	=	0,0000964	KΩ
R2= 0,0021	Ω	=	0,0000021	KΩ
R3= 0,0077	Ω	=	0,0000077	KΩ
C1= 4,23E-12	F	=	4,23E-06	μ F
C2= 4,05E-10	F	=	4,05E-04	μ F

CONSTANTES ASOCIADAS AL FILTRO DEL CANAL CARGA DERIVADA DEL NODO E

R1*C1=d1=	4,077E-13	d11+d12+d13+d14=d15=	3,103E-13
R2*C2=d2=	8,529E-13	d3+d4+d5=d16=	1,041E-01
R3=d3=	7,709E-03	d6*d7=d17 =	2,781E-26
R2=d4=	8,918E-15	d6+d7+d8=d18 =	3,160E-12
R1=d5 =	9,639E-02		
R3*C2=d6=	3,119E-12		
R2*C1=d7=	8,918E-15		
R3*C1=d8=	3,261E-14		
d1*d2*d3 =d9	2,681E-27		
d1*d4=d11 =	3,636E-27		
d1*d3=d12 =	3,143E-15		
d5*d6=d13 =	3,006E-13		
d2*d3=d14 =	6,575E-15		

Figura 5.59: Valores de los elementos del Filtro asociado al canal que establece la Carga del Nodo E. Red de 5 Nodos. Fuente: el autor

Las Figuras 5.60 y 5.61, muestran la impedancia del filtro ($Z_{Rfiltro}$) y la impedancia característica (Zc), asociadas al canal que establece la carga derivada del Nodo E,en magnitud y fase,en función de la frecuencia.Se observa que la impedancia del filtro es de tipo capacitivo y la impedancia característica, de tipo resistivo.

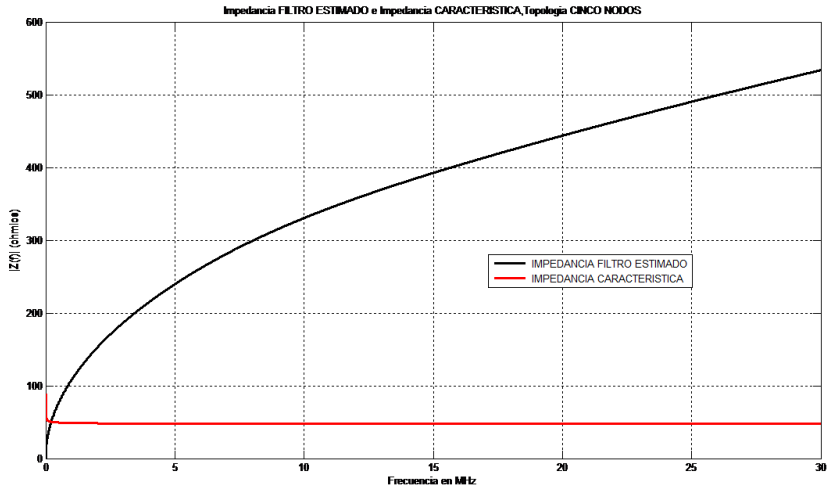


Figura 5.60: Impedancias del Filtro y Característica, asociadas al canal de la carga derivada del Nodo E, en función de la frecuencia. Red de 5 Nodos.
Fuente: el autor

2. Referenciando la topología Figura 2.4, conectada la impedancia del filtro $Z_{Rfiltro}$, se ajusta la DEP de transmisión en -55 dBm/Hz [28] y se opera sobre el sistema (5.64).

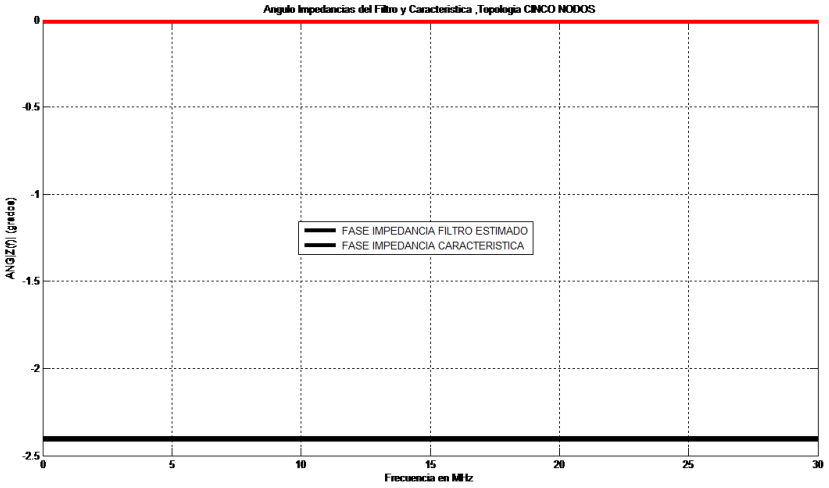


Figura 5.61: Fases Impedancia del Filtro e Impedancia Característica, en función de la frecuencia. Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

$$\begin{bmatrix} \frac{VT_x(f)}{ZT_x(f)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx} & \frac{-1}{B1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{B1} & \frac{A1}{B1}+\frac{A3}{B3}+Ys1 & \frac{-1}{B3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{B3} & \frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2 & \frac{-1}{B5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{B5} & \frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3 & \frac{-1}{B7} \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{-1}{B7}) & \frac{A7}{B7}+\frac{1}{Z_{RFiltro}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(f) \\ V_B(f) \\ V_C(f) \\ V_D(f) \\ V_E(f) \end{bmatrix} \tag{5.64}$$

3. El determinante del sistema con el Filtro $\Delta_{5Nodos.Filtro}$, aparece a continuación:

$$\begin{aligned} \Delta_{5Nodos.Filtro} = (\frac{-1}{B1}).(\frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx}).[(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{Z_{RFiltro}}) \\ -(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{1}{B7})^2-(\frac{1}{B5})^2.(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{Z_{RFiltro}})]+(\frac{A1}{B1}+\frac{1}{ZTx}).(\frac{1}{B3})^2 \\ .[(\frac{1}{B7})^2-(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{Z_{RFiltro}})]+(\frac{A3}{B3}+\frac{A5}{B5}+Ys2).(\frac{1}{B1})^2 \\ .[(\frac{A5}{B5}+\frac{A7}{B7}+Ys3).(\frac{A7}{B7}+\frac{1}{Z_{RFiltro}})-(\frac{1}{B7})^2] \end{aligned}$$

4. Expresiones de voltaje encontradas, conectando el Filtro: (5.65), (5.66), (5.67), (5.68), (5.69) y (5.70) son una modificación de las ecuaciones (5.15), (5.16), (5.17), (5.18),(5.19) y (5.20).

$$VA_{Filtro} = \frac{VT_x[(\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).(K1.(K2.K3 - K4) - K3.K5) + K6.(K5 - K1.K2)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.65)$$

$$VB_{Filtro} = \frac{-VT_x.K1.[K2.(K3.(\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}) - K6) - ((\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K4)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.66)$$

$$VC_{Filtro} = \frac{VT_x.[K1.K5.((\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K3 - K6)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.67)$$

$$VD_{Filtro} = \frac{VT_x.[-(\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K1.K8.K9)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.68)$$

$$VE_{Filtro} = \frac{[-VT_x.K1.K8.K9.K10]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.69)$$

$$Vs_{Filtro} = \frac{VT_x.Z_o}{(Z_o + ZT_x)} \quad (5.70)$$

5. Las funciones de transferencia del canal asociado al filtro, (5.71), (5.72),(5.73), (5.74) y (5.75).

$$H_{1Filtro}(f)_{5Nodos} = H_1(\frac{VA_{Filtro}}{VT_x}) = \frac{[K0.(K1.(K2.K3 - K4) - K3.K5) + K6.(K5 - K1.K2)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.71)$$

$$H_{2Filtro}(f)_{5Nodos} = H_2(\frac{VB_{Filtro}}{Vs_x}) = \frac{-K1.[K2.(K3.(\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}) - K6) - ((\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K4)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.72)$$

$$H_{3Filtro}(f)_{5Nodos} = H_3(\frac{VC_{Filtro}}{Vs_x}) = \frac{[K1.K5.((\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K3 - K6)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.73)$$

$$H_{4Filtro}(f)_{5Nodos} = H_4(\frac{VD_{Filtro}}{Vs_x}) = \frac{[-(\frac{A7}{B7} + \frac{1}{Z_{RFiltro}}).K1.K8.K9)]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \quad (5.74)$$

$$H_{5Filtro}(f)_{5Nodos} = H_5(\frac{VE_{Filtro}}{Vs_x}) = \frac{[-K1.K8.K9.K10]}{[\Delta_{5Nodos.Filtro}.ZT_x]} \tag{5.75}$$

6. Como elementos de verificación sobre la operación del Filtro, se muestra la función de transferencia del canal asociado al Backbone y carga derivada del Nodo E, con y sin el filtro,Figuras 5.62 y 5.63. Se observa que hasta 4.5 MHz, la función de transferencia con el filtro es mayor a la función de transferencia normal en 0.35 dB en promedio, después de 4.5 MHz, el comportamiento es similar. Este fenómeno, se refleja sobre la DEP de Señal y capacidad de canal.

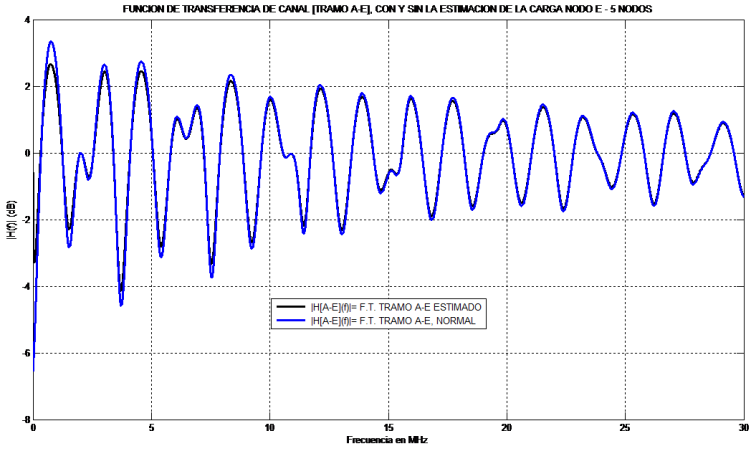


Figura 5.62: Función de Transferencia del Canal asociado al Backbone $|H_{CANAL}(f)|$= H($\frac{VE-VA}{Vsx}$), con y sin el Filtro en la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos.
Fuente: el autor

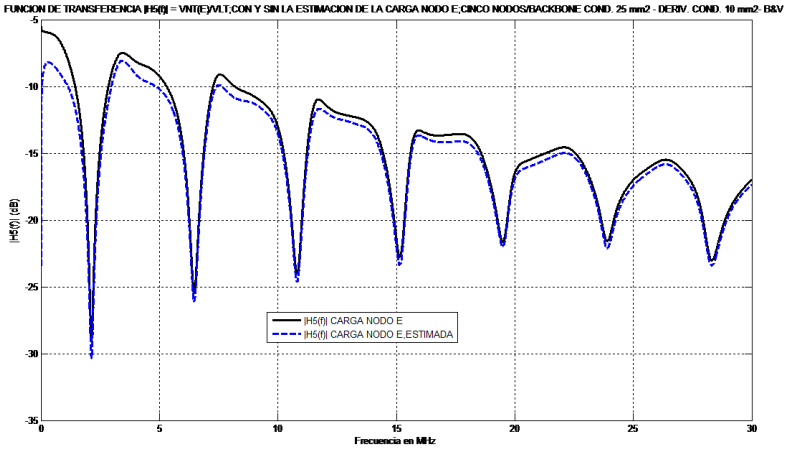


Figura 5.63: Función de Transferencia del Canal asociado a la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos.
Fuente: el autor

NOTA:

-Las impedancias del filtro y característica, se calcularon con el **Programa # 15** (Ver Anexo de programas).

-La función de transferencia del canal con y sin el uso del filtro en la Carga del Nodo E, se obtuvo con el **Programa # 16** (Ver Anexo de programas).

5.6.4. Efecto del Filtro sobre la DEP de Señal en el canal que establece la carga del Nodo E.Topología de 5 Nodos.

Con las expresiones (5.43), (5.44), (5.45) y (5.46),extraídas de la sección 5.3.4, se obtienen los resultados para las DEP de Señal en el canal que establece la carga del Nodo E, con y sin el Filtro, que se muestra en la Figura 5.64.

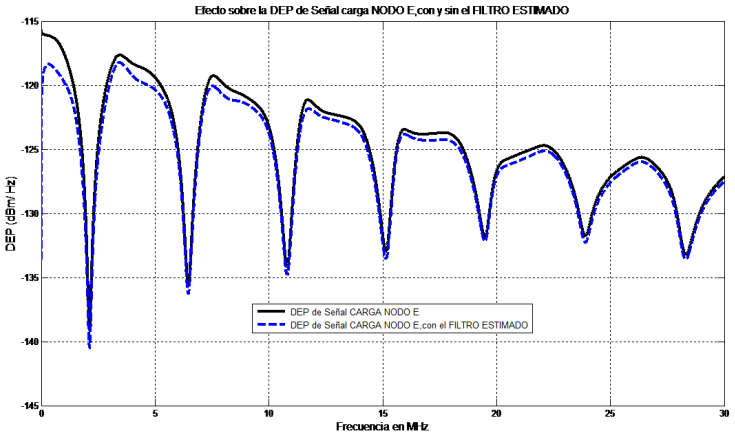


Figura 5.64: DEP de Señal en el canal establecido por la carga del Nodo E, con y sin el Filtro Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

El resultado obtenido para la DEP de Señal en el canal de la carga del Nodo E, con y sin el Filtro, de la Figura 5.64, se observa que hasta 10 MHz, la DEP de Señal del Filtro, es menor a la DEP de Señal de la impedancia característica en 0,6 dBm/Hz en promedio, después de 10 MHz, el comportamiento es similar.

NOTA: Las DEP de Señal en el canal que establece la carga derivada del Nodo E, con y sin el Filtro, se calcularon con el **Programa # 17** (Ver Anexo de programas).

5.7. Capacidad del Canal que establece la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos

Siguiendo la metodología utilizada en la sección 5.4. [DEP del ruido] y las relaciones (5.47),(5.48),(5.49) y (5.50) la sección 5.5. [Capacidad de Canal] y las relaciones (5.51),(5.52),(5.53),(5.54) y las consideraciones previas para llegar a (5.55), se obtienen los resultados para Capacidad de canal en la carga del Nodo E, que se muestra en la Figura 5.65 [33].

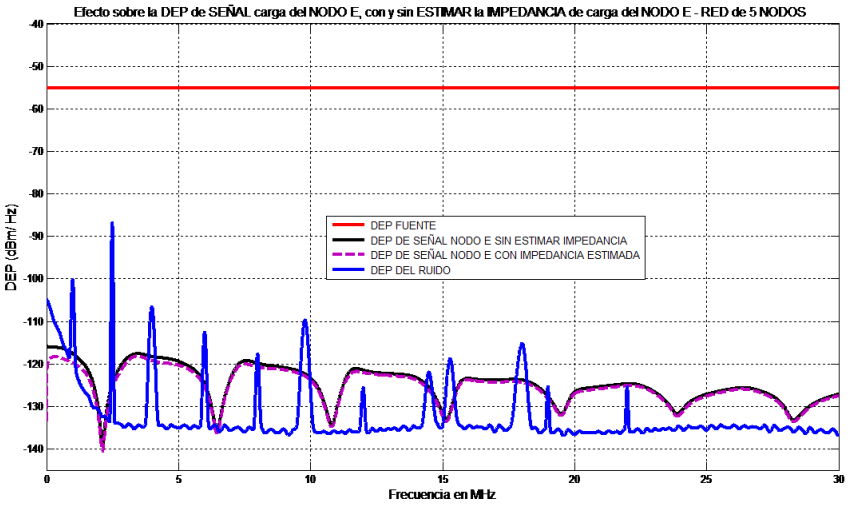


Figura 5.65: DEP recibida, ruido y relación SEŃAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos.
Fuente: el autor

Conocida $H_{CANAL}(f)$,se divide el canal de la carga derivada del Nodo E, en los subcanales (C_1,C_2,C_3,C_4,C_5) de ancho de banda **B**,como se aprecia en la Figura 5.66. La SNR_k y la potencia localizada $S_k(f)$ en cada canal se muestra en la ecuación (5.76) y la capacidad de canal de cada canal, en la ecuación (5.77).

$$SNR_k = \frac{|H_k(f)|^2 * S_k(f)}{S_n(f)}; \tag{5.76}$$

$$C_k = B * log_2[1 + \frac{|H_k(f)|^2 * S_k(f)}{S_n(f)}] \tag{5.77}$$

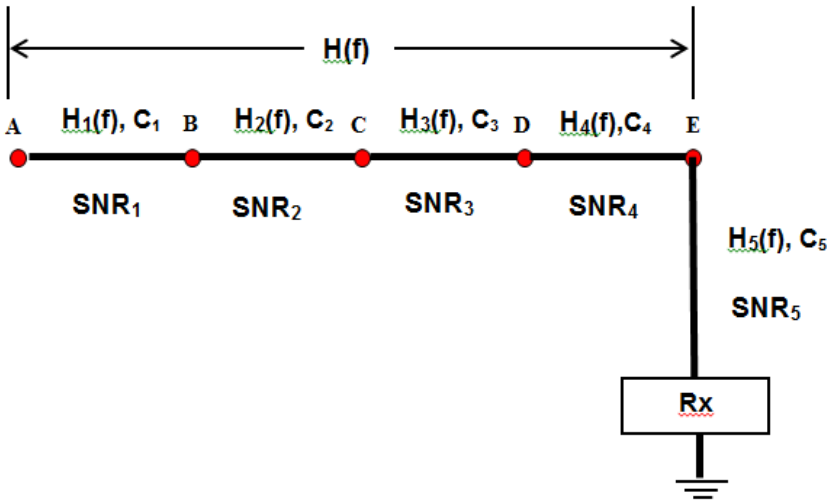


Figura 5.66: Subcanales (C_1,C_2,C_3,C_4,C_5), asociados al canal que establece la carga del Nodo E. Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

En cada tramo aparece $H_k(f)$, $SNR_k(f)$ y $C_k(f)$ [capacidad de canal], asociado a las características físicas del tramo de red.La Figura 5.67, muestra como verificación de la operación del Filtro, la función de transferencia del canal asociado al Backbone,con y sin el Filtro.

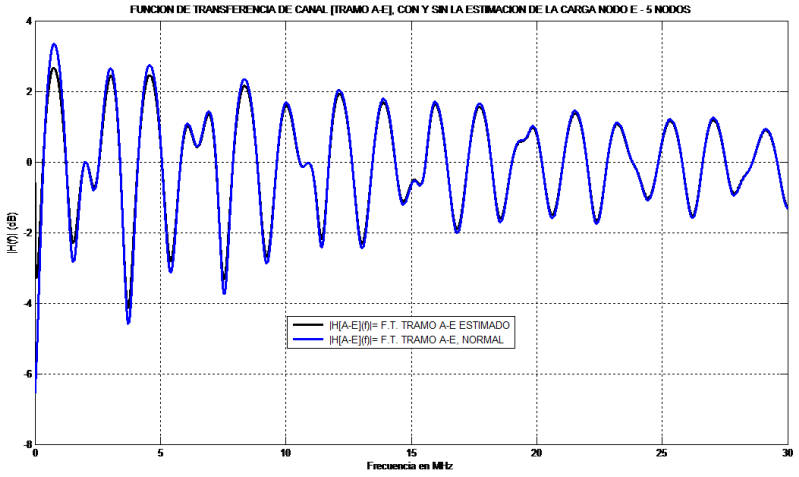


Figura 5.67: Función de Transferencia del canal asociado al backbone, con y sin el Filtro estimado. Red de 5 Nodos.

Fuente: el autor

Como se tienen varios canales, es necesario maximizar la capacidad de canal, sujeta a la potencia de transmisión **S**, ecuación (5.78).

$$C_{MÁX} = \sum_{k=1}^{N}(B * log_2[1 + \frac{|H_k(f_k)|^2 * S_k(f_k)}{S_n(f_k)}]); \quad sujeto\ a: \quad \sum_{k=1}^{N}(S_k) < \mathbf{S} \tag{5.78}$$

La expresión (5.78), se transforma para el caso específico de mediciones en redes BPL en (5.79), [33]. La FCC sugiere Δf =9.6 KHz.

$$C = \Delta f * \sum_{k=1}^{N} (log_2[1 + \frac{|H(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)}]); \quad (bps) \tag{5.79}$$

Donde:

$|H(f_k)|^2$, DEP de Señal de la carga derivada del Nodo E

$S_t(f_k)$, potencia de transmisión

$S_n(f_k)$, DEP del Ruido.

Cada una evaluada para los N componentes de frecuencia discretos.

De (5.79) se obtiene la relación Señal a Ruido (5.80) en el canal de la carga derivada del Nodo E. En la Figura 5.68 se muestra la relación Señal a Ruido con y sin el Filtro, para el canal de la carga derivada del Nodo E.

$$SNR_k = 10 * log_{10}[1 + \frac{|H(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)}]; \quad (dB) \tag{5.80}$$

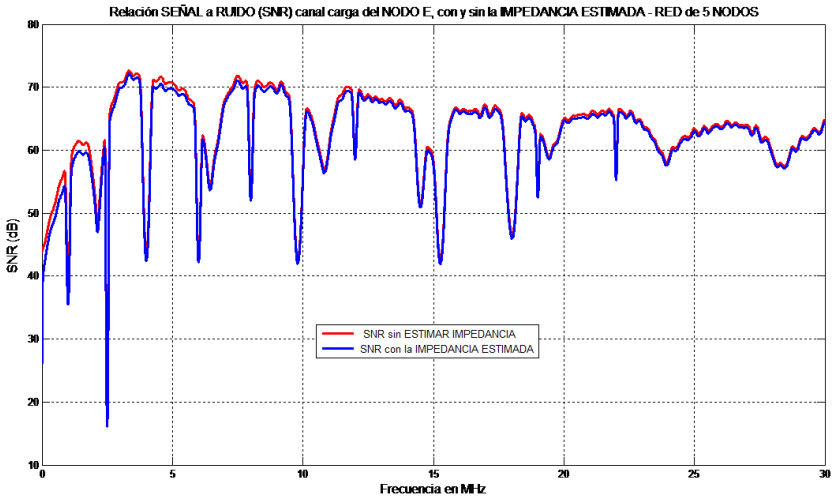


Figura 5.68: Relación Señal a Ruido en el Canal que establece la carga derivada del Nodo E, con y sin el Filtro. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

La Tabla [5.7], muestra el resumen de resultados para el promedio de la relación Señal a Ruido y la Tabla [5.8] la capacidad de canal, en el canal que establece la carga derivada del Nodo E con y sin el Filtro, ajustando la DEP de transmisión entre -52 dBm/Hz y -60 dBm/Hz.

Tabla 5.7: Resumen: Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo E, con y sin el Filtro.Topología de 5 nodos.

DEP de TRANSMISIÓN [dBm/Hz]	SNR SIN FILTRO [dB]	SNR CON FILTRO [dB]	VARIACIÓN [dB]	VARIACIÓN [%]
- 60	58.07	57.41	0.67	1.15
- 58	60.00	59.32	0.67	1.11
-57.50	61.56	60.90	0.67	1.09
-55	62.89	62.22	0.67	1.06
-52	65.67	65.00	0.67	1.02

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.8: Resumen: Capacidad de Canal carga derivada Nodo E, con y sin el Filtro.Topología de 5 nodos.

DEP de TRANSMISIÓN [dBm/Hz]	CAPACIDAD de CANAL SIN FILTRO [Mbps]	CAPACIDAD DE CANAL CON FILTRO [Mbps]	VARIACIÓN [Mbps]	VARIACIÓN [%]
- 60	185.20	183.07	2.13	1.15
- 58	191.32	189.18	2.14	1.12
-57.50	196.33	194.20	2.13	1.08
-55	200.56	198.43	2.13	1.06
-52	209.42	207.28	2.14	1.02

Fuente: elaboración propia

Los resultados de las Tablas [5.7] y [5.8], muestran que utilizando el Filtro en la carga derivada del Nodo E - para las mismas condiciones de transmisión -:la Relación Señal a Ruido experimenta disminución en promedio del 1.09 % equivalente a 0.67 dB y la capacidad de canal experimenta disminución relativa del 1.09 % equivalente a 2.13 Mbps.

NOTAS:

-La DEP recibida, ruido y relación SEÑAL a RUIDO, en el canal de la carga del Nodo E, con y sin el Filtro, se estimó con el **Programa # 18** (Ver Anexo de programas).

-Las Función de Transferencia del canal asociado al Backbone con y sin el Filtro, se calculó con el **Programa # 19** (Ver Anexo de programas).

- La Relación Señal a Ruido en el Canal de la carga derivada del Nodo E, se calculó con el **Programa # 20** (Ver Anexo de programas).

Capítulo 6

Prueba de Hipótesis

En este trabajo, se demostró que utilizando el método propuesto de líneas de transmisión para obtener las funciones de transferencia de los canales que establecen las cargas derivadas de una topología monofásica - acondicionada como canal para transmisión de señales de comunicaciones -, permite determinar la existencia de diferentes tipos de filtros (pasa altos y pasa bajos), asociados a los canales.

Para el diseño de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas más alejadas de la fuente de transmisión BPL, en las topologías propuestas de 3 y 5 Nodos, se utilizó el procedimiento de ingeniería inversa en redes, conocido como síntesis de redes.

En la verificacón y prueba sobre la operación de los Filtros,aparece un **comportamiento** que no hace parte del marco teórico,sino, es el resultado del trabajo. Este **comportamiento**, se refiere a la posibilidad de reemplazar un canal caracterizado en ***parámetros distribuidos***, por un canal caracterizado en ***parámetros concentrados*** y comprende los siguientes aspectos:

1. Para obtener el filtro asociado al canal, se parte de la función de transferencia del canal que establece la carga derivada y relaciona voltajes de salida y entrada del canal, en función de la frecuencia [modelo de dos puertas].

2. El proceso de síntesis de redes, utiliza métodos numéricos en función de la frecuencia compleja, para determinar la función de transferencia del canal.

3. Para determinar los elementos que componen el filtro asociado al canal,la función de transferencia del canal,transforma la red correspondiente al filtro, en una función de transferencia que relaciona el voltaje y la corriente de salida. La representación inicial del ***comportamiento*** encontrado, se muestra en la Figura 6.1.

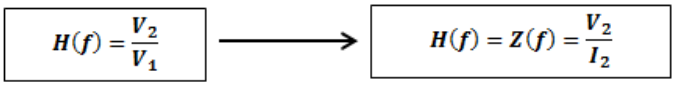


Figura 6.1: Transformación de funciones de transferencia para el canal que establece la carga derivada

Fuente: el autor

4. Establecida la función de transferencia del canal asociado a la carga derivada, como una impedancia en ***parámetros concentrados***, para probar su operación, se reemplaza la carga derivada inicial [impedancia característica], por esta impedancia [impedancia del Filtro] Figura 6.2,para obtener transferencia máxima de potencia en la carga, [15], [34], porque la impedancia que asume el canal,es la impedancia del Filtro, como se comprobó en las secciones 5.3.3. y 5.6.3.

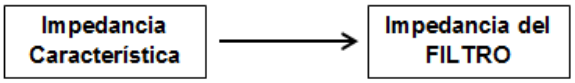


Figura 6.2: Reemplazo de la Impedancia Característica por la Impedancia del Filtro, en el canal establecido por las cargas derivadas

Fuente: el autor

En las Figuras 6.3 y 6.4, se representa la transferencia máxima de potencia en los canales que establecen las cargas derivadas, para topologías de 3 y 5 Nodos, respectivamente.Se observa como **justificación**, que la impedancia del Filtro en la Red de 3 Nodos Figura 6.3, al asumir el valor de la impedancia característica [50Ω], disipa una potencia máxima de $5{,}8e^{-8}$ Watts.

En la Figura 6.4, la impedancia del Filtro en la Red de 5 Nodos, al asumir el valor de [25Ω], que es la impedancia del canal, disipa una potencia máxima de $1{,}38e^{-8}$ Watts, que es menor a la potencia disipada por la impedancia característica $1{,}6e^{-8}$ Watts a 50Ω.

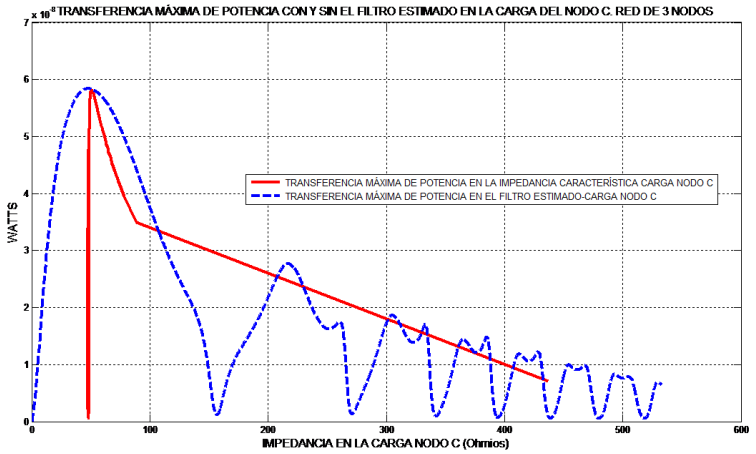


Figura 6.3: Transferencia Máxima de Potencia en función de la Impedancia de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

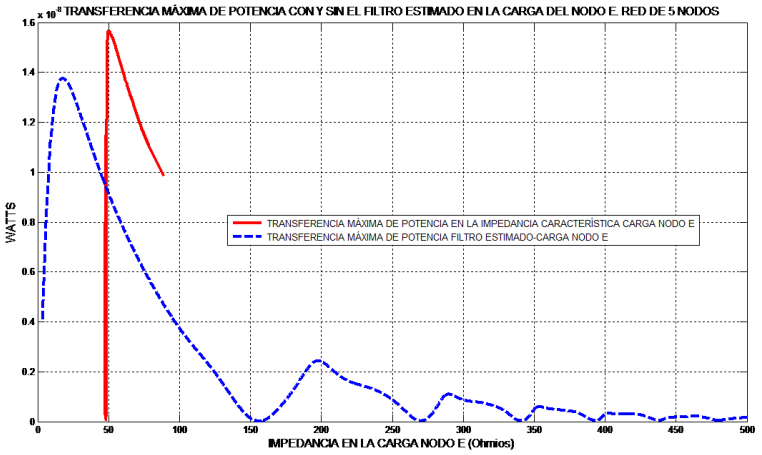


Figura 6.4: Transferencia Máxima de Potencia en función de la Impedancia de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

5. De acuerdo al punto anterior y para un valor medio de impedancia característica de 47.86 Ω , el análisis de impedancia [parte real,parte imaginaria], conduce a determinar el Factor de Calidad del Filtro asociado al canal de la carga derivada correspondiente. En las Figuras 6.5 y 6.6, se muestran la parte real e imaginaria de la impedancia del Filtro asociado al canal, para las topologías propuestas de 3 y 5 Nodos.En la Tabla 6.1, aparece el resumen de resultados del análisis de impedancia y Factor de Calidad promedios y en las Figuras 6.7 y 6.8, la representación del Factor de Calidad, para las topologías propuestas de 3 y 5 Nodos.

Tabla 6.1: Resumen: Impedancia y Factor de Calidad. Filtro asociado al Canal de las cargas derivadas

TOPOLOGÍA	IMPEDANCIA DEL FILTRO [Ω]	FACTOR DE CALIDAD [Q_o]	f_o [MHz]	ANCHO DE BANDA FILTRO [MHz]
3 NODOS	49.15	0.089	2.5	177
5 NODOS	24.90	0.532	15	177

Fuente: elaboración propia

Según la Tabla [6.1], los Filtros, poseen valores pequeños de Factor de Calidad [Q_o <10], fuerte amortiguamiento [valores pequeños de resistencias en la red],reflejado en la potencia disipada en el Filtro por período. Los valores bajos de Factor de Calidad en los filtros asociados al canal, aseguran un ancho de banda suficiente para las señales de comunicaciones [177 MHz].

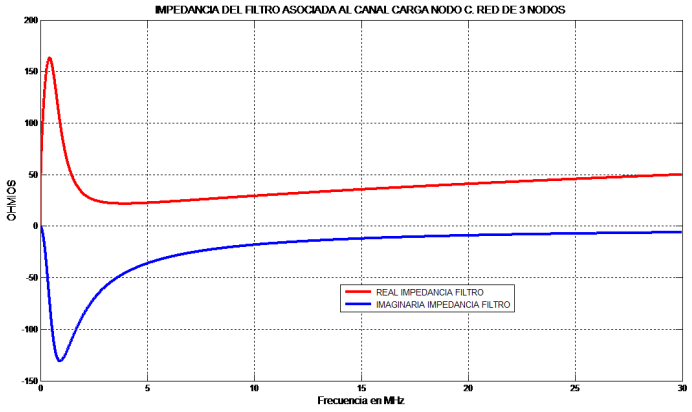


Figura 6.5: Impedancia del Filtro, canal de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

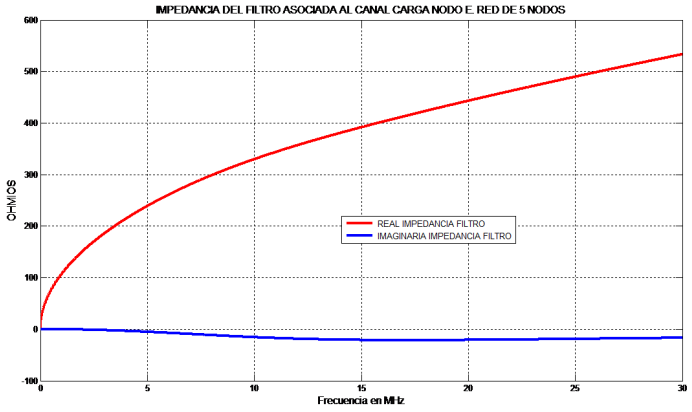


Figura 6.6: Impedancia del Filtro, canal de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

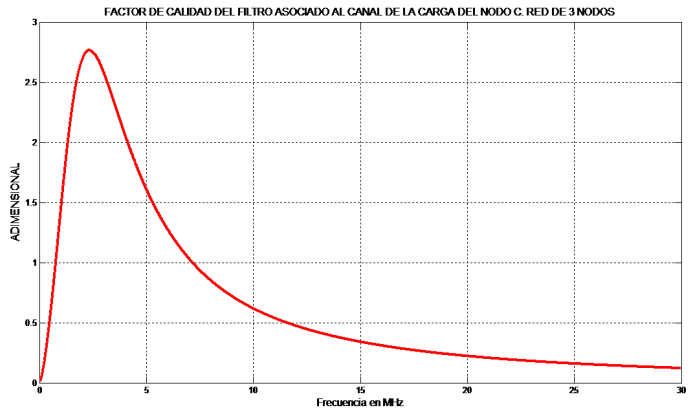


Figura 6.7: Factor de Calidad, Filtro canal Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos
Fuente: el autor

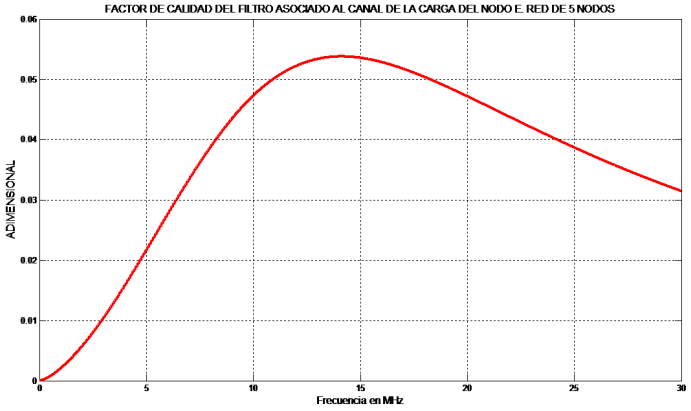


Figura 6.8: Factor de Calidad, Filtro canal Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos
Fuente: el autor

6. Verificando la potencia recibida en la carga derivada con y sin el Filtro, se obtienen los resultados que aparecen en las Figuras 6.9 y 6.10. Se observa en la Figura 6.9 que la potencia recibida en la carga derivada del Nodo C, de la topología monofásica de 3 Nodos, es mayor en un 30 % cuando la impedancia de carga es el Filtro.Respecto a la Figura 6.10, la potencia recibida en la carga derivada del Nodo E, en la topología monofásica de 5 Nodos, es mayor en un 80 % cuando la impedancia de carga es la Impedancia Característica. Se deduce que, en la topología de 5 Nodos, utilizando el Filtro como carga, se obtiene un ahorro significativo en potencia de transmisión.

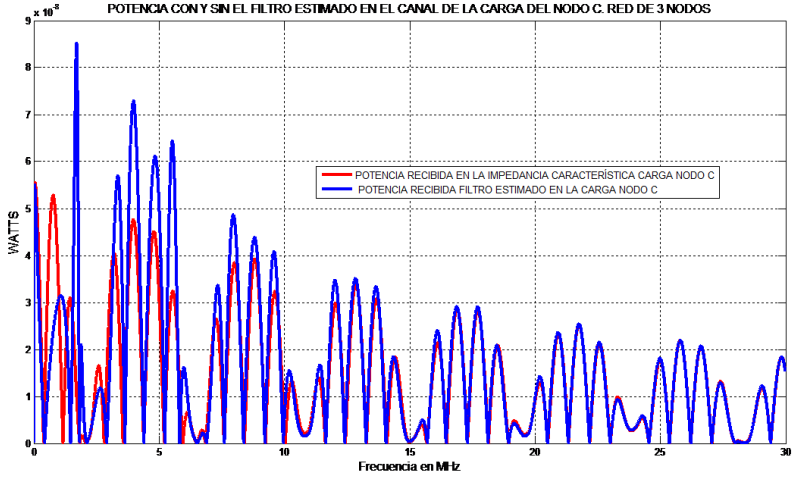


Figura 6.9: Comparación de Potencias Recibidas con y sin el Filtro en el canal de la Carga Derivada del Nodo C. Red de 3 Nodos

Fuente: el autor

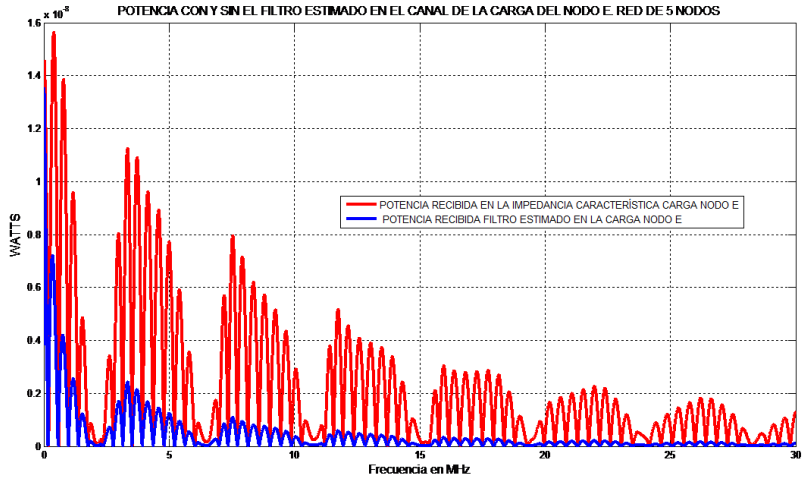


Figura 6.10: Comparación de Potencias Recibidas con y sin el Filtro en el canal de la Carga Derivada del Nodo E. Red de 5 Nodos

Fuente: el autor

6. Los resultados comparativos obtenidos en cuanto a:función de transferencia del canal asociado a la carga derivada, DEP de Señal y Capacidad de Canal, son similares cuando se utiliza como carga la Impedancia Característica y el Filtro estimado.

Capítulo 7

Alcances y limitaciones

El proceso de investigación utilizado en este trabajo, se soporta en el método científico; hipotético-deductivo, cuyas características básicas son:

1. Observación del fenómeno a estudiar.
2. Creación de una hipótesis para explicar el fenómeno.
3. Deducción de consecuencias o proposiciones más elementales que la propia hipótesis.
4. Verificación o comprobación de la verdad de los enunciados deducidos comparándolos con la experiencia.

De acuerdo con las pautas establecidas en el método científico y aplicadas en este trabajo, se cumplen, en el sentido de obtener un nuevo conocimiento para lograr los objetivos propuestos.Se debe señalar que la experimentación, estudio y resultados obtenidos, se realizaron sobre un modelo de estudio, donde se plantearon diferentes tipos de modelos: matemáticos, técnicos y científicos y se demostró su gran utilidad para obtener soluciones al problema propuesto.La posibilidad de realizar pruebas experimentales para verificar la hipótesis, abre importantes escenarios de estudio que beneficia las líneas de investigación.

La limitación que tiene el estudio realizado, se presenta en que se aplica a topologías tipo bus y únicamente sobre la carga final [carga más alejada de la fuente BPL].

Para posteriores estudios, queda abierta la posibilidad de desarrollar un modelo computacional

robusto que reproduzca las funciones de transferencia asociadas a los canales que establecen las cargas derivadas, en topologías monofásicas: para diferente configuración, para mayor número de nodos y modeladas en parámetros concentrados, para diferente ubicación de cargas; que simule un canal BPL.

Capítulo 8

Conclusiones

A continuación de forma explicita se presenta el tipo de Objetivo y la forma como se dió su cumplimiento.

Objetivo General: Determinar un método para el diseño de los diferentes tipos de filtros, presentes en el canal que establecen las cargas derivadas en una topología monofásica para una vivienda con sistema BPL.

1. El método utilizado para determinar el tipo de filtro [**Capítulo 3**] que se presenta en los canales que establecen las cargas derivadas de las topologías monofásicas propuestas y el diseño de los filtros [**Sub-secciones 5.3.2 y 5.6.2**], permiten cumplir el objetivo general [página 2] y son consistentes y verificables desde los resultados obtenidos [**Sub-secciones 5.3.3, 5.3.4, 5.5, 5.6.3, 5.6.4, 5.7**] , porque se aplicaron en conductores validados [4 x 10 mm^2 y 4 x 25 mm^2, material de cobre], cuyos análisis y pruebas de respuesta en frecuencia realizaron Bostoen y Van de Wiel [1].

Objetivos Específicos

Objetivo Específico 1: Determinar por la configuración geométrica entre nodos adyacentes de la topología monofásica, los parámetros que caracterizan una línea de transmisión al inyectar señales eléctricas con frecuencia de operación entre 1,8 MHz y 30 MHz.

2. La obtención de los parámetros primarios [**Sub-ección 2.1.5**], permitieron modelar las líneas de transmisión de la topología monofásica [**Sub-sección 2.1.6**], que junto con la aplicación de los Desarrollos Teóricos Propios [Aportes] [**Capítulo 4**], se llega a un modelo de red de líneas de transmisión en parámetros de 2 puertas, donde se pueden inyectar señales eléctricas con frecuencia de operación entre 1,8 MHz y 30 MHz y obtener las respectivas funciones de transferencia de los canales. Con lo expresado en la conclusión 2, se da cumplimiento al Objetivo Específico 1.

Objetivo Específico 2: Evaluar el conjunto de funciones de transferencia de los canales que establecen las cargas derivadas en las líneas de transmisión, para determinar, modelar y diseñar los diferentes tipos de filtros que las puedan reproducir.

3. Las funciones de transferencia de los canales, se obtienen al desarrollar los sistemas de líneas de transmisión propuestos en los Desarrollos Teóricos Propios [Aportes] [**Capítulo 4, Sección 4.2, expresiones (4.34), (4,35)**]. En la [**Sección 5.2**], aparece el resultado de los sistemas líneas de transmisión propuestos y se muestra el conjunto de funciones de transferencia obtenidos. En la [**Sección 5.3, Sub-secciones: 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3**] se evalúan las funciones de transferencia para determinar, modelar y diseñar los diferentes tipos de filtros para la topología monofásica de tres nodos. En la [**Sección 5.6, Sub-secciones: 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3**] se evalúan las funciones de transferencia para determinar, modelar y diseñar los diferentes tipos de filtros para la topología monofásica de cinco nodos.

La validación del modelo utilizado para el diseño de los Filtros, se soporta sobre los desarrollos teóricos [8] que se muestran en la **Sección 2.1.8.** y **Sub-secciones 2.1.8.1., 2.1.8.2.** y su extensión y explicación en la **Fase 5**, **Sección 3.1.**. Con lo expresado en la conclusión 3, se da cumplimiento al Objetivo Específico 2.

Objetivo Específico 3: Comprobar la operación de los filtros para determinar el impacto

que producen sobre el canal de comunicación.

4. Para verificar la operación de los filtros, se aplicó la siguiente estrategia; se escoge el filtro asociado al canal que establece la carga derivada [impedancia característica] más alejada de la fuente BPL y se reemplaza esta carga derivada por el Filtro [impedancia del Filtro], procedimiento que se explica en el[**Capítulo 6**]. Los resultados obtenidos respecto a función de transferecnia, DEP de Señal, relación Señal a Ruido y Capacidad de Canal, ajustando la DEP de transmisión entre - 52 dBm/Hz y - 60 dBm/Hz , mostró lo siguiente:

4.1. Funciones de transferencia con desplazamientos entre 0.35 dB y 0.45 dB, para las topologías monofásicas de 3 y 5 Nodos respectivamente, [páginas: 71,102].

4.2. DEP de Señal con desplazamientos entre 2 dBm/Hz y 0.6 dBm/Hz, para las topologías monofásicas de 3 y 5 Nodos respectivamente,[páginas: 73,103].

4.3. Relación Señal a Ruido con variación entre 0.0177 dB [0.03 %] y 0.67 dB [1.09 %], para las topologías monofásicas de 3 y 5 Nodos respectivamente,[páginas: 81,107].

4.4. Capacidad de Canal con variación entre 0.056 Mbps [0.0249 %] y 2.13 Mbps [1.09 %], para las topologías monofásicas de 3 y 5 Nodos respectivamente,[páginas: 81,107].

4.5. Potencia recibida en la carga, mayor en un 30 % [impedancia de carga = Filtro] y mayor en un 80 % [impedancia de carga = impedancia característica], para las topologías monofásicas de 3 y 5 Nodos respectivamente,[página 114].

4.6. Como producto de este trabajo, aparece un comportamiento que se verificó,consistente con la posibilidad de reemplazar un canal caracterizado en **parámetros distribuidos**, por un canal caracterizado en **parámetros concentrados**, porque las respuestas en función de transferencia,DEP de Señal, relación Señal a Ruido y Capacidad de Canal, son similares.

4.7. Se puede afirmar que la red en ***parámetros concentrados*** del Filtro estimado, recrea el

comportamiento de la función de transferencia del canal y sirve como un modelo computacional para simular un canal BPL.

Con lo expresado en la conclusión 4, se da cumplimiento al Objetivo Específico 3.

5. Los resultados obtenidos que aparecen en la Tabla 5.6,respecto a los valores de los elementos de los Filtros asociados a los canales que establecen las cargas derivadas, indican la posibilidad de estandarizar los Filtros que se puedan presentar en una topología monofásica.

6. Los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden asimilar con análisis realizados, en conductores **AWG** alojados en tubería PVC, utilizados en las instalaciones eléctricas interiores de viviendas en Colombia.

Bibliografía

[1] Bostoen, T. y Van de wiel,O., *Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 mhz to 30 mhz for broadband powerline communications (plc)*, V 1,Alcatel corporate research center, francis wellesplein 1, b-2018 antwerpen, Bélgica, 2000.

[2] ICONTEC , *Norma Técnica Colombiana. NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano.*, Colombia, 1998-11-25.

[3] Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-ICEL , *Normas para el diseño y construcción de sistemas de subtransmisión y distribución Colombiano.*, Colombia, 1998.

[4] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación-ICONTEC , *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas- RETIE*, Colombia, 2007.

[5] Bastidas, H. y Patińo, M., *Modelo de cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas de baja tensión subterráneas e instalaciones internas para uso en telecomunicaciones*, Universidad Nacional de Colombia. Revista: Ingeniería e investigación vol. 31 No. 3, diciembre 2011 (121- 129).

[6] Cárdenas, R., *Red Residencial de Banda Ancha por Línea de Potencia Basada en Relevo para la Mitigación de la Interferencia v.2.1.*, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia. 2013.

[7] Matsunaga, N., *Diseño e implementación de un emulador de canal BPL en FPGA*, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Buenos Aires. 2012.

[8] Soler, F.,*Síntesis de Circuitos.*,1 ed. Bogotá. Imprenta Copypal. 1981.120p.

[9] Marthe E.,*Indoor Radiated Emission Associated with Power Line Communication Systems*,in IEEE International Symposium on Bibliography 147 Electromagnetic Compatibility, Montreal, 2001, pp. 517-520.

[10] Zimmermann y Doster,*A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Ferquency Range,1999*, Zimmermann y Dostert, A Multipath Model for the Powerline Channel, 2002.

[11] Rivero, B. y Moncayo, A., *Diseño y análisis de una red de banda ancha usando tecnología bpl en la urbanización residencial y privada "vía al sol"*., Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC). Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Guayaquil. Ecuador. 2011.

[12] Hayt, W., *Teoría Electromagnética.*, 2 ed. México. Editorial McGraw-Hill. 1989.490p. ISBN: 968-6046-11-9.

[13] Neri, R., *Líneas de Transmisión*,1st ed. México, México: McGraw-Hill, 2004.

[14] García, G. , Estopiñán, A.,García, M., *Circuitos de parámetros distribuidos: Aplicación a líneas de transporte de energía eléctrica.*,1. ed. Espańa. Prensas de la Universidad de Zaragoza.1996. 206 p. ISBN 8477334668 ISBN-13 9788477334668

[15] Scott, D.,*Análisis de Circuitos Eléctricos.*,1 ed. Espańa. Editorial McGraw-Hill. 1988.720p. ISBN: 84-7615-269-8.

[16] Stevenson, W., *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia* ,2 ed. México, México: McGraw-Hill, 1979.ISBN 968-6046-98-4

[17] Ogata K., *Ingeniería de control moderna.*,3 ed. México. Editorial Pearson. 1988. 997 p. ISBN 0-13-227307-1.

[18] Chapra, S.,*Métodos Numéricos para ingenieros* , 5 ed.Editorial McGraw-Hill. 2007.1020p. ISBN: 978-970-10-6114-5. México, D.F.

[19] Shankaralingappa C. B., Suresh. H. Jangamashetti,*Facts Controllers to Improve Voltage Profile and Enhancement of Line Loadability in EHV long Transmission Lines*,Senior member, IEEE. 2013.

[20] Dorf, S.,*Circuitos Eléctricos Introducción al Análisis y Diseño.* , Alfaomega editores, 5 Ed. México, D.F., 2007

[21] Tucci, M.,*Computational Intelligence in Power-Line Communication Systems.*, Beau Bassin, Mauritius: VDM Publishing House, 2009, p. 12.

[22] Flórez, L.,Barón, A.*Introducción al análisis de sistemas de potencia volume II* ,2 Ed.Colombia. 1993. 220 p. Unidad de Publicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

[23] Haykin,Simon.,*Sistemas de Comunicaciones*, 2 ed. España. Editorial Limusa. 817p. 2002. ISBN: 97-8968-186-3074

[24] Boylestad R.,*Electrónica teoría de circuitos*,5 ed. México. 1994. 913p. ISBN 968-880-347-2.

[25] Gaviño, R.,*Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*,1 ed.Prentice Hall. México, 2010. 513 p.ISBN: 978-607-442-842-1.

[26] Kreyszig, H., *Advanced Engineering Mathematics* ,9 ed. México, México: Limusa Wiley, 2012.

[27] Tucci, M.and et al,*Blind Channel Estimation for Power-line Communications by a Kohonen Neural Network*, in IEEE International Symposium on Power-line Communications and Its Applications, Pisa, 2007, pp. 35-40.

[28] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION,*15.209 Radiated Emission Limits*,p. 810, 2009, Disponible en: http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2009- title47-vol1/pdf/CFR-2009-title47-vol1-part15.pdf.

[29] IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY,IEEE Standard for Broadband over Power Line,*Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*,IEEE Std 1901-2010.New York: IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2010

[30] D. Benyoucef.,*A New Statistical Model of the Noise Power Density Spectrum for Powerline Communication.*, Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), pag. 136 a 141,2003.

[31] C. E. Shannon,*A mathematical theory of communication.*,Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948.

[32] A. Goldsmith, P. P., Varaiya,*Capacity of fading channels with Channel Side Information*,IEEE Trans. on Information Theory, vol. 43, no. 6, pp. 1986-1992, November, 1997.

[33] TLICH Mohamed and et al,*A Broadband Powerline Channel Generator*,IEEE International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, Pisa, 2007, pp. 505-510.

[34] Clayton,R,*Introduction to Electromagnetic Compatibility*,2 Ed, JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION,2006, pp. 70-73.