



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS
DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE
COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO
DE TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA**

José Elias Fernández Recinos

Asesorado por el Ing. Carlos Julio Valdés Marckwordt

Guatemala, mayo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS
DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE
COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO
DE TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ ELIAS FERNÁNDEZ RECINOS

ASESORADO POR EL ING. CARLOS JULIO VALDÉS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. Roberto Urdiales Contreras
EXAMINADOR	Ing. Francisco Tzirín Jocholá
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los requisitos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA,

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica – Eléctrica, el 17 de octubre de 2007.



José Elías Fernández Recinos

Guatemala, 2 de Marzo de 2008

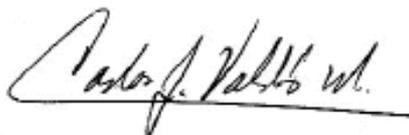
Ingeniero
Otto Andrino
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que, en mi calidad de asesor, he revisado el trabajo de graduación titulado "**PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO DE TRANSMISION LA RED ELECTRICA**", presentado por el estudiante José Elías Fernández Recinos, carné 1991-12657, por lo que considero que cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo y con los requisitos que la Facultad de Ingeniería exige.

Así mismo, me permito informarle que como asesor, comparto los criterios que el indicado trabajo contiene y por lo tanto, doy mi aprobación.

Atentamente,



Ing. Carlos Julio Valdés Marckwordt
Asesor
Colegiado No. 6636

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 07 de ABRIL 2008.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS DE UN
SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE
COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO DE
TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA, del estudiante; José Elias
Fernández Recinos, por considerar que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andriano González
Coordinador Área de Electrotécnica



OFAG/sro



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; José Elías Fernández Recinos titulado: **PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escarido Martínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 10 DE ABRIL, 2008.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.169.08

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA A LAS SEÑALES DE COMUNICACIONES QUE UTILIZAN COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN LA RED ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario José Elías Fernández Recinos, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, mayo de 2008

/cc

c.c. archivo.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Por su infinito amor y darme su bendición y protección durante toda mi vida.

MI NOVIA NANCY

Porque su amor es mi fuente de inspiración, mi razón por la cual vivir y el tesoro más preciado con el que Dios me ha bendecido en la vida.

MIS PADRES

Elias Fernández y Zoila Recinos de Fernández, por darme la vida y dar lo mejor de sí para que nunca me faltara nada. Sus esfuerzos y sacrificios no fueron en vano.

MI TÍA YOLI †

Por el amor y cuidados que me dio en mi niñez, y sé que desde el cielo comparte con migo esta alegría.

MIS ABUELITOS

Gonzalo Recinos, Concepción de Recinos † y Ernestina Sagastume †, por su cariño y apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

MIS HERMANOS

Mario David y Juan Carlos, por los lazos de sangre y el afecto que nos une.

MIS SOBRINOS

Karla María, Paola María, Luis Enrique y Fátima, porque más que mis sobrinos son como hijos para mí.

MI ASESOR

Ing. Carlos Valdés, por su apoyo en la elaboración de este trabajo y por su amistad.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Por brindarme la oportunidad de pasar por sus aulas, porque más que una escuela del saber es una escuela de la vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO	1
1.1 Tipos de servicio eléctrico	3
1.1.1 Servicio eléctrico domiciliario y comercial	3
1.1.2 Servicio eléctrico industrial	4
2. CONDUCTORES ELÉCTRICOS	5
2.1 Descripción y clases de conductores eléctricos	5
2.2 Conductores para líneas de transmisión	5
2.3 Conductores para instalaciones interiores	6
2.4 Conductores para comunicaciones	7
2.5 Efectos que se generan en los conductores de electricidad	9
2.6 Propiedades de los conductores	9
2.6.1 Resistencia de los conductores	9

2.6.2 Inductancia en los conductores	11
2.6.3 Inductancia de una línea de transmisión	12
2.6.4 Capacitancia en los conductores	13
2.6.5 Capacitancia de las líneas de transmisión	15
2.7 Parámetros de los conductores eléctricos	17
3. ARMÓNICOS Y TRANSITORIOS	19
3.1 Definición de armónicos	19
3.1.1 Trayectoria de los armónicos	21
3.1.2 Origen de los armónicos	22
3.1.3 Origen de los armónicos	23
3.1.4 Contenido normal de los armónicos	24
3.2 Régimen transitorio	25
4. POWER LINE COMUNICATION (PLC)	29
4.1 Fundamentos del PLC	29
4.2 Normalización	32
4.3 Modulación OFDM	34
5. RUIDO ELÉCTRICO	37
5.1 Ruido en las sistemas eléctricos	37
5.2 Clases de ruido	39
5.2.1 Ruido térmico	39
5.2.2 Ruido de intermodulación	39

5.2.3 Ruido impulsivo	40
5.2.4 Ruido gaussiano	40
5.2.5 Ruido correlacionado	41
5.2.6 Ruido blanco	41
5.3 Densidad espectral	42
6. CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS	45
6.1 Teorema de Nyquist	45
6.2 Teorema de Shannon-Hartley	46
6.3 Relación señal-ruido	47
7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	49
8. ANTECEDENTES	51
9. EQUIPOS Y AMBIENTES DE FUNCIONAMIENTO	53
9.1 Determinación de parámetros en ambiente ideal	53
9.1.1 Señales de comunicaciones	54
9.1.2 Señales PLC	56
9.1.3 Equipos PLC	57
9.1.4 Suma de señales	59
9.2 Servicio en ambiente real	59
9.2.1 Transmisión de servicios en tiempo real	60

9.3 Diferentes tipos de equipos y cargas conectados a la red eléctrica	62
9.3.1 Sistemas de protección y UPS	62
9.3.2 Cargas inductivas	63
9.3.3 Cargas no lineales	65
9.3.4 Circuitos en diferentes fases	66
9.3.5 Voltajes y corrientes transitorios	68
9.3.6 Transporte de señales de comunicación en líneas de transmisión	68
9.4 Capacidad de transmisión	70
10. EQUIPOS QUE PRODUCEN RUIDOS ELÉCTRICOS	73
10.1 Diferentes equipos que producen ruido	74
10.1.1 Ruido producido por equipos electrónicos	74
10.1.2 Ruido producido por sistemas de iluminación	75
10.1.3 Ruido producido por motores de corriente alterna	76
10.1.4 Ruido producido por elementos de control de dispositivos de corriente alterna	77
10.1.5 Ruido en los transformadores de potencia	77
11. ANÁLISIS ELÉCTRICO	79
11.1 Análisis de los efectos de la inductancia y capacitancia del sistema	79
11.1.1 Análisis en circuitos sin cargas	82
11.1.2 Análisis en circuitos con cargas	88
11.2 Análisis de los efectos causados por los transformadores de potencia	92
11.3 Análisis en circuitos monofásicos	97
11.4 Análisis en circuitos trifásicos	102

11.5 Análisis de los ruidos eléctricos producidos por los equipos del sistema	105
11.5.1 Ruidos producidos por voltajes de línea	113
11.5.2 Ruido producido por equipos que producen armónicos	113
11.5.3 Ruido producido por equipos que generan transitorios	115
11.5.4 Ruido producido por inducción	118
11.5.5 Análisis del ruido en los transformadores	119
11.5.5.1 Ruido térmico en los transformadores de potencia	121
11.6 Efectos de ruidos de diferentes equipos a la señal de comunicaciones	124
12. PRUEBAS Y MEDICIONES DE CAMPO	129
12.1 Ambiente de pruebas	131
12.2 Determinación de las pérdidas por el conductor	140
12.2.1 Conexión en el mismo punto, sin otro tipo de carga	140
12.2.2 Conexión a 15 metros de distancia, sin otro tipo de carga	142
12.2.3 Conexión a 30 metros de distancia, sin otro tipo de carga	144
12.2.4 Conexión a 60 metros de distancia, sin otro tipo de carga	146
12.3 Determinación de los problemas y pérdidas generados por las diversas cargas en los circuitos	148
12.3.1 Conexión en un circuito con un motor universal	148
12.3.2 Conexión en un circuito con un motor de inducción	151
12.3.3 Conexión en un circuito de iluminación fluorescente	154
12.3.4 Conexión en circuitos con cargas no lineales	156
12.4 Determinación de los problemas y pérdidas al conectar los equipos en circuitos de diferentes líneas y fases	158
12.4.1 Conexión entre diferentes fases sin otro tipo de carga (circuitos	

trifásicos)	158
12.4.2 Conexión entre diferentes fases con diferentes cargas (circuitos trifásicos)	160
12.5 Determinación de los problemas y pérdidas ocasionados al transmitir señales por las líneas de distribución	162
12.5.1 Conexión exterior entre dos acometidas diferentes	162
12.6 Efectos en los servicios transmitidos	165
12.7 Identificación de recursos	168
CONCLUSIONES	169
RECOMENDACIONES	171
BIBLIOGRAFÍA	175
ANEXOS	177

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Diagrama unifilar de distribución de un sistema de potencia.	2
2. Conductor de aluminio con refuerzo de acero (ACSR).	6
3. Tipos de conductores utilizados en comunicaciones.	8
4. Campo magnético de una línea de transmisión ejerciendo efecto sobre otra.	13
5. Campo eléctrico entre dos conductores.	14
6. Efecto capacitivo entre conductores.	16
7. Circuito equivalente de una línea de conducción eléctrica	17
8. Forma en que se genera una onda distorsionada con base a una onda fundamental más las ondas con un número de orden múltiplo de la frecuencia.	20
9. Armónicas fluyendo hacia un banco de transformadores.	21
10. Armónicas fluyendo hacia un banco de transformadores y un banco de capacitores.	22
11. Resultante de la suma de ondas.	23
12. Transitorio que aparece al cerrar el interruptor del circuito.	26
13. Diagrama básico de cómo transmitir una señal de comunicaciones con tecnología PLC por el sistema de distribución eléctrica.	34
14. Modulación QAM y PSK.	35
15. Modulación OFDM.	36
16. Efectos del ruido en una señal digital.	38
17. Gráfica Densidad Espectral de Potencia.	42

18. Conexión de equipos PLC en un circuito ideal.	53
19. Forma de una señal de comunicaciones de forma ideal.	55
20. Forma de una señal de comunicaciones de forma real, distorsionada por la transmisión y las atenuaciones en el medio.	56
21. Forma de una portadora de señal PLC.	57
22. La señal de comunicaciones entra a un equipo PLC, la cual le transforma la forma de onda y la frecuencia para poder transmitirla por el sistema eléctrico.	58
23. Desmodulación de una señal PLC a la señal de comunicaciones.	58
24. Suma de una señal amplitud grande y frecuencia baja con una de amplitud pequeña y frecuencia alta.	59
25. Ambiente real en el cual se trasmite una señal de comunicaciones: un circuito con todo tipo de cargas.	60
26. Un UPS es un aislante natural para las señales de comunicaciones	63
27. Distorsión del voltaje en una lámpara fluorescente.	65
28. Diagrama de dos equipos PLC conectados en dos fases distintas de un transformador.	67
29. Diagrama general de cómo se puede transmitir un servicio de Internet, a través de un sistema de distribución eléctrica y los equipos utilizados.	72
30. Conducta de un circuito, según la frecuencia aplicada.	80
31. Un circuito como se observa en A, a bajas frecuencias su circuito equivalente es como el que se muestra en B y a altas frecuencias es como el que se muestra en C.	81
32. Diagrama de conexión entre dos equipos PLC en un circuito dedicado	82
33. Diagrama equivalente del conductor eléctrico.	83
34. Señal PLC al momento de partir del equipo transmisor y al momento de llegar al equipo receptor, atenuada por el medio.	87

35. Ambiente real de conexión de dos equipos PLC.	88
36. Diagrama equivalente de un circuito con carga.	89
37. Diagrama simplificado de un circuito con carga.	90
38. Circuito equivalente de un transformador de potencia.	93
39. Circuito equivalente del transformador, con el primario referido al secundario.	94
40. Capacitancias entre devanados y espiras de un transformador.	95
41. Parámetros de la espira del devanado de un transformador.	96
42. Circuito equivalente de un transformador, incluyendo sus capacitancias internas.	96
43. Conexión de dos equipos PLC entre dos líneas de transformador, en un circuito monofásico 120/240V, conectado a la salida del mismo.	97
44. Circuito equivalente para el diagrama de la figura 43.	98
45. Conexión de dos equipos PLC a dos líneas diferentes, en un circuito 120/240 V, tomando en cuenta el conductor eléctrico.	99
46. Circuito equivalente para el diagrama de la figura 45.	100
47. Circuito equivalente de dos equipos PLC conectados en líneas diferentes de un circuito 120/240 V, tomando en cuenta las impedancias del transformador, los conductores y las cargas.	101
48. Conexión de dos equipos PLC entre dos fases de un circuito trifásico	102
49. Conexión de dos equipos PLC, directamente a la salida de los transformadores trifásicos.	103
50. Conexión de dos equipos PLC en dos fases distintas, teniendo en medio los conductores y las cargas.	104
51. L_s como sale del equipo (señal 1) y como llega (señal 2) a diferentes frecuencias.	108
52. Ruido producido por una fuente conmutada.	109
53. Densidad espectral del ruido de un equipo con fuente conmutada.	109

54. Densidad Espectral de un motor universal y un equipo de TV.	110
55. Forma de onda de un transitorio.	116
56. Forma de onda de un transitorio producido por un <i>dimmer</i> .	117
57. Transitorio generado por un arco eléctrico.	118
58. Ruido a la entrada de un transformador el cual es llevado por los conductores desde las cargas.	120
59. Densidad espectral del ruido total de un edificio de 2 niveles a la señal de comunicaciones, la cual tiene un valor de 63 dBV.	127
60. Medición del voltaje entre fases a la salida del banco de transformadores.	132
61. Corriente medida en una de las fases a la entrada del transformador	133
62. Voltaje medido entre una fase y neutro.	134
63. Corriente medida en el neutro.	135
64. Armónicas medidas en la corriente de una fase.	136
65. Armónicas medidas en el voltaje entre una fase y neutro.	137
66. Armónicas medidas en el voltaje entre dos fases del transformador.	138
67. Armónicas medidas en el neutro.	139
68. Conexión de los equipos en un mismo punto sin pérdidas por carga	140
69. Conexión en el mismo punto, sin otro tipo de carga.	141
70. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 15 metros de distancia.	142
71. Conexión a 15 metros de distancia, sin otro tipo de carga.	143
72. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 30 metros de distancia.	144
73. Conexión a 30 metros de distancia, sin otro tipo de carga.	145
74. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 15 metros de distancia.	146
75. Conexión a 60 metros de distancia, sin otro tipo de carga.	147

76. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con un motor universal.	149
77. Conexión en un circuito con carga inductiva.	150
78. Conexión de equipos PLC en conjunto con un motor de inducción monofásico.	151
79. Medición de los bits transmitidos al estar en el mismo circuito que el motor de inducción.	152
80. Bits transmitidos durante el arranque del motor de inducción.	153
81. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con un sistema de iluminación fluorescente.	154
82. Conexión en un circuito de iluminación fluorescente.	155
83. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con cargas no lineales.	156
84. Conexión en circuitos con cargas no lineales.	157
85. Conexión de los equipos PLC a la salida de un banco de transformadores, entre dos fases.	158
86. Conexión entre diferentes fases sin otro tipo de carga.	159
87. Conexión de los equipos PLC en dos circuitos con más cargas, conectados a fases diferentes del transformador.	160
88. Conexión entre diferentes fases con diferentes cargas (circuitos trifásicos).	161
89. Conexión exterior entre dos acometidas diferentes.	163
90. Conexión exterior entre servicios conectados al mismo banco de transformadores, pasando por los cables externos del servicio de energía eléctrica.	164
91. Medición de la transferencia de bits para el diagrama de la figura 93 y 94.	165
92. Transmisión de datos por una red eléctrica	166

93. Transmisión de telefonía por un sistema eléctrico	167
---	-----

TABLA

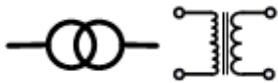
I. Valores de SNR y su significado	111
------------------------------------	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

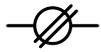
AC	Corriente alterna
B	Ancho de banda (Hertz)
C	Capacitancia
Ch	Ancho de Banda Digital (Bits)
dB	Decibelios
dBV	Decibelio volt
dBv	Decibelio milivolt
E	Campo eléctrico
f	Frecuencia
F	Faradio
G	Conductancia
H	Henry
Hz	Hertz
K	Constante de Boltzman
KHz	Kilohertz
KV	Kilovolt
KVA	Kilovolt-amperio
KW	Kilowatt
°K	Grado Kelvin
L	Inductancia
Ln	Nivel de ruido
LAN	Red de área local
Ls	Nivel de ruido de la señal PLC

mH	Milihenry
Mb	Megabits
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
mt	Metro
mV	Milivolt
N	Potencia del ruido
R	Resistencia
r	Radio del conductor
RMS	Valor eficaz
Rs	Resistencia superficial
SNR	Relación señal-ruido
T	Temperatura
THD	Distorsión de armónica total
V	Volt
Vn	Voltaje del ruido
Vs	Voltaje RMS
w	Velocidad angular
W	Watts
XC	Reactancia capacitiva
XL	Reactancia inductiva
Z	Impedancia
ε	Permeabilidad del medio
μF	Microfaradio
μ	Permitibilidad del medio
ρ	Resistividad
Σ	Sumatoria
σ	Conductividad

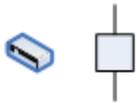
LISTA DE SÍMBOLOS



Transformador de potencia



Tomacorriente



Equipo PLC



Resistencia



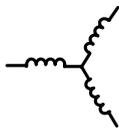
Inductancia



Capacitancia



Red LAN



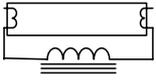
Banco de transformadores trifásicos



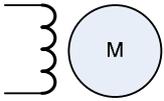
Interruptor termo magnético



Tablero de distribución



Iluminación fluorescente



Motor de inducción



Motor universal



Teléfono IP



Computadora portátil



Computadora

GLOSARIO

- Alto Voltaje** Voltajes utilizados para transferir energía a largas distancias, desde el lugar de generación hasta las subestaciones de las ciudades. En nuestro medio generalmente se usan rangos de 69 KV a 230 KV.
- Ancho de Banda** Es la anchura, medida en hertz, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal. Está limitado por una frecuencia mayor y menor.
- Ancho de Banda Digital** Es la cantidad de datos que se pueden transmitir en una unidad de tiempo. Se mide en bits por segundo.
- Armónico** Componente sinusoidal de una señal. Su frecuencia es un múltiplo de la fundamental.
- Bit** Bit es el acrónimo de *Binary Digit* (dígito binario). Un bit es un dígito del sistema de numeración binario. Es la unidad mínima de información empleada en informática, en cualquier dispositivo digital, o en las comunicaciones.
- Bajo Voltaje** Voltaje utilizado para la distribución de energía desde los transformadores hasta los usuarios finales. En nuestro medio se utilizan rangos de 120, 208 ó 240 Volts.

Delay Retardo en el arribo de los paquetes en las comunicaciones.

DSL *Digital Suscribe Line*. Tecnología utilizada para comunicaciones a través del par telefónico, pudiendo convivir en el mismo medio voz y datos. Es muy utilizada por las compañías telefónicas.

Ethernet Es el nombre de una tecnología de redes de computadoras de área local (LANs) basada en tramas de datos. Utiliza el estándar IEEE 802.3.

IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, es una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros eléctricos, ingenieros en electrónica, científicos de la computación, ingenieros en informática e ingenieros en telecomunicación.

Instalación Indoor Instalación de un medio eléctrico el cual es externo, tal como las líneas de transmisión y distribución de energía.

Instalación Outdoor

Instalación de un medio eléctrico el cual es interno, tal como las instalaciones eléctricas de comercios, industrias y residencias.

ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones. Es el organismo especializado de las Naciones Unidas encargado de regular las telecomunicaciones, a nivel internacional, entre las distintas administraciones y empresas operadoras.
<i>Jitter</i>	Diferencia de tiempo cuando un paquete de comunicaciones llega antes o después de lo esperado.
Mbps	Megabit por segundo. Unidad utilizada para indicar un ancho de banda digital de 1×10^6 bits por segundo.
Medio Voltaje	Voltaje transmitido en los sistemas de distribución eléctrica entre subestaciones y centros de distribución. En nuestro medio el rango más usado es de 13.8 KV.
OFDM	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales, es una modulación que consiste en enviar la información modulando en QAM o en PSK un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias.
QAM	Modulación de amplitud en cuadratura, es una modulación digital avanzada que transporta datos cambiando la amplitud de las ondas portadoras. Se utiliza para la transmisión de datos a alta velocidad por canales con ancho de banda restringido.
PLC	Comunicaciones mediante línea de energía eléctrica. Describe diferentes tecnologías que utilizan las líneas de

energía eléctrica convencionales para transmitir señales para propósitos de comunicación.

- PSK** La modulación por desplazamiento de fase es una forma de modulación angular consistente en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos
- Ruido Eléctrico** Son todas las perturbaciones eléctricas que interfieren sobre las señales transmitidas o procesadas.
- SNR** Relación señal-ruido. Es el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Este margen es medido en Decibelios.
- Transitorios** Es la respuesta de un circuito eléctrico que se extingue en el tiempo.
- UPS** *Uninterruptible Power Supply*, por sus siglas en inglés, es un dispositivo que provee de energía al existir una falla en el sistema eléctrico. También cumple funciones de regulación y protección de circuitos.

RESUMEN

Al hacer una implementación utilizando la red eléctrica como medio de transmisión para señales de comunicaciones de red, resultan una gran variedad de problemas que afectan el rendimiento de la misma, o simplemente no funciona, lo que ocasiona que muchas veces quienes estaban interesados en hacer esta implementación opten por otras opciones, y a raíz de esto, la tecnología de *Power Line Communication* (PLC) ha sido muy poco implementada en nuestro medio.

Lo anterior sucede debido a que las señales de comunicaciones al ser transmitidas por un sistema eléctrico sin carga, muestran una conducta de funcionamiento aceptable, pero al conectar las cargas de los diferentes equipos del sistema, comienzan los problemas. Los equipos conectados en la instalación eléctrica de los clientes finales son quienes afectan en gran parte, por lo cual hay que analizar todo tipo de cargas y sus efectos de los diferentes equipos conectados, siguiendo su trayectoria hasta llegar por los conductores eléctricos a los transformadores de potencia, los cuales también generan sus propios problemas a las señales de comunicaciones.

En el presente trabajo se hace un análisis minucioso de cómo los diferentes equipos que comparten la red eléctrica afectan a los servicios de comunicaciones que son transmitidos por el mismo medio, para tener una guía a la hora de hacer un diseño o una implementación y tomar en cuenta sus efectos al hacer el análisis eléctrico del medio y de esta forma evitar los problemas que generalmente se tienen.

De esta forma, se podrá seleccionar mejor un ambiente para la implementación del PLC con base a las cargas y equipos conectados, y se tendrán las bases y herramientas adecuadas para identificar los diferentes problemas que pueden ocasionar los equipos conectados al sistema eléctrico a los servicios de comunicaciones que se transmitan por él.

OBJETIVOS

General

Determinar cuáles son los principales problemas que generan los diferentes equipos activos y pasivos conectados a un sistema de potencia y sus fenómenos eléctricos, a las diferentes señales de comunicaciones que se pueden transmitir por un sistema eléctrico.

Específicos

1. Recopilar qué parámetros pueden ser medidos del sistema eléctrico para predecir la conducta de un ambiente de comunicaciones con base a los equipos eléctricos y de potencia conectados y conocer de antemano su forma de funcionamiento.
2. Determinar que servicios de comunicaciones son más sensibles a problemas y cuales funcionan mejor en un ambiente de comunicación sobre sistemas eléctricos en base a los dispositivos que tienen conectados.
3. Definir las circunstancias necesarias para hacer más eficiente un ambiente de transmisión de comunicaciones poco utilizado hasta el momento en nuestro medio.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el servicio de energía eléctrica ha alcanzado niveles de cobertura muy altos en nuestro medio, el cual se puede proveer a un alto porcentaje de la población del vital servicio de electricidad, sobre todo en el área urbana. Esto implica que en industrias, comercios, instituciones y en un alto número de residencias cuentan con electricidad y por consiguiente con la infraestructura para la transmisión de la misma.

Adicionalmente, existe también una infraestructura grande y costosa en líneas de transmisión para llevar el servicio eléctrico hasta los usuarios por parte de las empresas distribuidoras. Para cualquier proveedor de servicios eléctricos, poder encontrar otros tipos de servicios que se puedan transportar por estos medios ya existentes les beneficiaría altamente, ya que tendrían más utilidades y aprovecharían mejor su infraestructura.

Debido a lo anterior, ya se han hecho en diferentes países pilotos para poder transmitir por medio del sistema eléctrico (por líneas de transmisión e instalaciones eléctricas interiores) señales de datos, Internet y telefonía, las cuales suponen un beneficio alto tanto para los proveedores de energía al incrementar su facturación al proveer nuevos servicios con una inversión baja, y para los usuarios, ya que pueden obtener los mismos servicios que les dan las empresas de comunicaciones a un mejor precio, y sobre todo, porque no tienen que hacer una inversión en instalaciones de red ni equipo costoso.

Las infraestructuras eléctricas se puede decir que están presentes en cualquier lugar, no así las infraestructuras de comunicaciones tales como fibras ópticas, antenas para comunicación inalámbrica, cableados especiales, etc.; por lo cual, sería muy beneficioso conseguir popularizar la transmisión de señales de comunicaciones conjuntamente con la de energía eléctrica, para poder llevar desarrollo a lugares donde no se tienen los recursos necesarios o los presupuestos no alcanzan para invertir en sistemas más costosos.

Sin embargo, en la práctica, esto no ha sido un éxito debido a diversos factores de tipo tecnológico y administrativo, ya que en la actualidad no hay suficientes estándares oficiales que normalicen la transmisión de los diferentes tipos de servicios de comunicación sobre los sistemas eléctricos, y sobre todo, por los problemas generados al mezclar señales tan sensibles como las de comunicaciones, con los voltajes, corrientes, inducciones, armónicas, capacitancias, y otros que son generados por equipos conectados a la red eléctrica.

Adicionalmente, los conductores que transmiten energía eléctrica (tales como los conductores de cobre rígidos utilizados en las instalaciones interiores o los cables con alma de acero utilizados en las líneas de transmisión) no son diseñados para la transmisión de señales de comunicaciones, ya que para poder transmitirlos de forma óptima necesitan algún tipo de blindaje para evitar interferencias (como los cables coaxiales, los cables con pantalla, o los cables trenzados), y por consiguiente generan sus propios problemas a la hora de transmitir por ellos una señal de comunicaciones.

Por otro lado, aún en nuestros días, en nuestro medio, en muchas industrias, comercios, oficinas, entidades gubernamentales, centros educativos,

etc. los servicios de comunicaciones aún son limitados o inexistentes debido al alto costo de inversión, sobre todo en la infraestructura de redes locales, siendo esto una seria limitante para su propio crecimiento.

Sin embargo, todos estos lugares poseen instalaciones eléctricas las cuales pueden ser usadas para transmisión de datos, Internet y telefonía por red (sin necesidad de invertir en las plantas telefónicas tradicionales, las cuales por pequeñas que sean son de costos elevados), pero el desconocimiento y la falta de investigaciones de campo que den a conocer estos potenciales hacen que no se puedan optimizar los recursos existentes.

En la mayoría de ocasiones, tratar de hacer convivir un sistema de potencia eléctrica y un sistema de comunicaciones utilizando el mismo medio de transmisión, puede generar resultados no deseados, por lo que es de suma importancia conocer los efectos que ejercen los diferentes equipos conectados en la red eléctrica al mezclar ambos tipos de servicios.

La transmisión de señales de comunicación por los sistemas de potencia, produce que los servicios transmitidos por ellos (datos, Internet, voz) sean aún de mala calidad y con muchas limitantes. El objetivo de este trabajo es analizar los diferentes inconvenientes generados en el sistema eléctrico y sus componentes activos y pasivos para las señales de comunicación de red que se pueden transmitir por el mismo medio, y así poder analizarlos y considerarlos a la hora de querer implementar una solución como esta, y diseñar un sistema eficiente y con servicios de la mejor calidad posible.

1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO

Los sistemas de distribución eléctrica son aquellos que sirven para llevar la energía eléctrica desde el lugar donde es generada hasta los consumidores finales por medio de líneas de transmisión. Los sistemas de distribución se dividen en redes de alta, media y baja tensión.

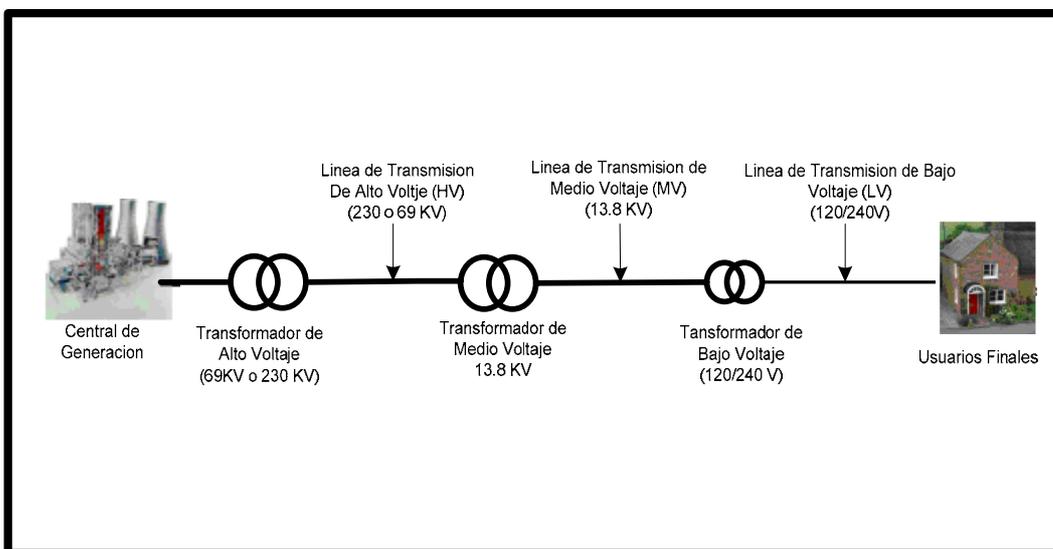
La red de alta tensión sirve para hacer llegar la energía desde los centros de producción hasta los de consumo (núcleos de población e industrias). La mayoría de los tendidos de alta tensión son aéreos, y los valores de tensión eléctrica que se manejan en estos tramos son del orden de los cientos de Kilovolts, al permitir estas elevadas tensiones un transporte de la energía más eficiente.

En los puntos de consumo, como las ciudades, suele haber grandes centros de transformación que convierten esta energía eléctrica a unos valores de tensión inferiores, de forma que se origina una segunda red, con valores que generalmente están entre 10 y 20 Kilovolts. Ésta es la red eléctrica de tensión media.

Por último, se produce una nueva transformación para poder suministrar electricidad a los usuarios finales, en las ciudades existen instalaciones incorporadas a los edificios o bajo tierra que se conocen como centros de transformación, y en ellos tiene lugar la transformación a los valores de 120 a 240 Volts que se maneja habitualmente. Esto es lo que se conoce como baja tensión.

Un centro de transformación puede servir a una cantidad variada de clientes, dependiendo del tipo de servicio (domiciliario, empresarial o industrial), así como del tipo de carga que se tenga. En la mayoría de casos, existen postes con transformadores que hacen la conversión de voltaje medio a voltaje bajo, donde se distribuye el servicio que va para los usuarios. En la figura 1 se muestra el diagrama unifilar de un sistema de transmisión eléctrica, desde que es generada hasta que llega el servicio a los usuarios.

Figura 1. Diagrama unifilar de un sistema de transmisión eléctrica, desde que es generada la energía hasta llegar al usuario final.



Fuente: Elaboración propia

1.1 Tipos de servicio eléctrico

Dependiendo de la carga y el tipo de usuario (domiciliar, industrial o comercial), existen diferentes tipos de servicio eléctrico que se le puede suministrar, entre ellos están los que se detallan a continuación.

1.1.1 Servicio eléctrico domiciliar y comercial

-Monofásico 120/240 Volts: Este es el más utilizado por las residencias, hay para carga baja (menos de 100 amperios y una demanda de hasta 20 KW) o carga alta (hasta 200 amperios y una demanda de hasta 48 KW). Consta de tres hilos (dos líneas vivas de 120 Volts y una neutra).

-Trifásico 120/208 Volts: Para cargas mayores de 50 KVA y menores de 500 KVA. Se utiliza para edificios de apartamentos, oficinas, y centros comerciales. Consta de 4 hilos (3 líneas de 120 Volts y una neutra), y proviene de un banco de transformadores conectados en estrella aterrizada.

-Trifásico 13.8 KV: Para edificios y centros comerciales con cargas mayores a 500 KVA. Se debe de tener un banco de transformadores propio para convertir los voltajes a 120/208 Volts.

1.1.2 Servicio eléctrico industrial

-Monofásico 120/240 Volts: tres hilos (dos vivas y una neutra) para cargas menores de 75 KVA.

-Trifásico 120/240 Volts: Conexión en delta, cuatro hilos, para cargas mayores de 75 KVA y menores de 225 KVA.

-Trifásico 120/208 Volts: Conexión en estrella, cuatro hilos (tres fases de 120 Volts y una neutra), para cargas mayores de 75 KVA y menores de 225 KVA,

-Trifásico 7620/13200 Volts: Puede ser para servicios mayores de 225 KVA y menores de 500 KVA, con voltajes secundarios de 120/240, 120/208, 277/480 y 240/480 Volts, o para servicios mayores de 500 KVA y menores de 1000 KVA, siendo el voltaje del secundario será el que el interesado considere adecuado. En ambos casos el usuario debe de proveer el banco de transformadores.

2. CONDUCTORES ELÉCTRICOS

2.1 Descripción y clases de conductores eléctricos

Los conductores eléctricos cuyo propósito es transportar la electricidad, son fabricados generalmente de cobre, debido a la excelente conductividad de este material, o de aluminio que aunque posee menor conductividad es más económico y liviano, y suelen estar rodeados de un material aislante con el propósito de proteger el material y evitar el riesgo de electrocución. En las líneas de altas tensiones aéreas se emplean cables sin aislante protector, ya que se está lo suficientemente separado de las otras líneas y cuenta con aislantes externos que las separan de las torres y postes.

Los conductores eléctricos, según su utilización se dividen en:

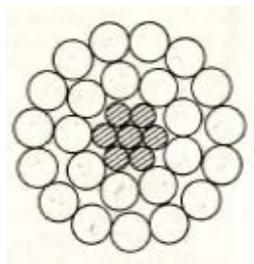
- Conductores para líneas de transmisión
- Conductores para instalaciones interiores
- Conductores para comunicaciones

2.2 Conductores para líneas de transmisión

Son básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Se utilizan para la transmisión de alta, media y baja tensión. Para la transmisión de alta y media tensión, se utilizan conductores desnudos (sin aislante), no así para la transmisión de la baja tensión.

Están compuestos por varios hilos de conductor, trenzados en un conductor central. Son fabricados de aluminio, aleaciones de aluminio con silicio y magnesio y conductores mixtos de aluminio y acero. Algunos tienen el alma (parte central del conductor) de acero, pero solo para fines mecánicos que permiten darle solides y resistencia, y no es tomada en cuenta en el cálculo eléctrico del conductor (figura número 2).

Figura 2. Conductor de aluminio con refuerzo de acero (ACSR) utilizado para líneas de transmisión.



Fuente: William Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, página 34.

2.3 Conductores para instalaciones interiores

Son los que se utilizan para la conducción de energía eléctrica en los clientes finales y conectan las cargas al sistema. Se utilizan en residencias, comercios e industrias, y son fabricados de cobre. Los conductores eléctricos para interiores constan de tres partes que son:

- El alma o elemento conductor
- El aislamiento
- Las cubiertas protectoras

El alma o elemento conductor es fabricado de cobre y su objetivo es transportar el flujo eléctrico para alimentar todas las cargas que consumen energía. Dependiendo el tipo de alma, el conductor puede ser rígido o formado por un solo conductor grueso, denominado alambre, o flexible cuando esta formado por varios alambres delgados, denominado cable.

El aislamiento tiene la función de evitar que la energía eléctrica que circula por el entre en contacto con el exterior, provocando una caída de tensión, un corto circuito, o que los conductores estén en contacto entre si. Generalmente se construyen de polímeros y para su correcto funcionamiento deben de considerarse parámetros como temperatura, humedad y agentes químicos.

Las cubiertas protectoras son aquellas que tienen la función de proteger el conductor de daños mecánicos, como pueden ser golpes, raspaduras, etc. Consiste en una pequeña capa plástica generalmente transparente que viene sobre el aislante.

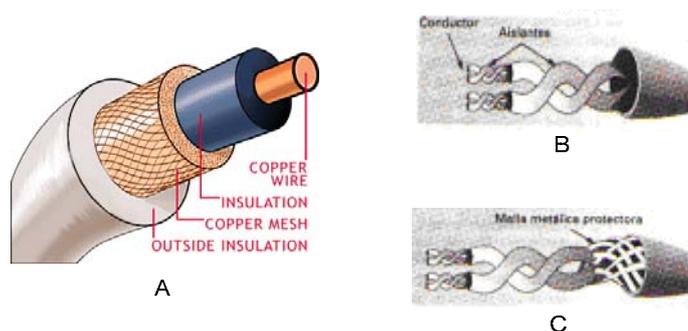
2.4 Conductores para comunicaciones

Se utilizan para transmitir señales que sirven para diversos tipos de comunicación, ya sea analógica o digital. Transportan señales de teléfonos, televisión, datos y cualquier tipo de señalización que se desee transmitir. Las características de estas señales es que tienen voltajes pequeños comparados con los de los voltajes de potencia, y frecuencias muy altas. Las señales son muy susceptibles a interferencias, atenuaciones y ruidos que afectan la fidelidad de la misma, por lo que los conductores están especialmente diseñados para el

transporte de las mismas. Los conductores más utilizados son el coaxial y el par trenzado.

El coaxial tiene un conductor central y un conductor cilíndrico el cual esta sobre el conductor central, el cual esta separado por un aislante. Este tipo de arreglo anula los campos entre los conductores. El par trenzado son conductores de cobre, generalmente rígido (alambre), en el cual los conductores son agrupados en pares y entorchados entre si. Esto anula en gran parte los campos entre ellos. Los conductores de par trenzado más comunes son el cable multipar, el cable trenzado sin pantalla (UTP), y el cable trenzado con pantalla (STP). La pantalla sirve para anular las interferencias exteriores. En la figura 3 se muestran estos tipos de cable.

Figura 3. Tipos de conductores utilizados en comunicaciones: Coaxial(A), UTP (B), STP (C).



Fuentes: searchnetworking.techtarget.com/WhatIs/images/coaxla.gif y h2non.wordpress.com/2007/03/17/cable-utp-stp-y-ftp/

2.5 Efectos que se generan en los conductores de electricidad

-Efecto Piel: Este efecto ocasiona que los electrones circulen por las capas exteriores de los conductores y esto ocasiona que el centro del conductor tenga menos corriente que la superficie. A altas frecuencias, este fenómeno aumenta, circulando todos los electrones por el exterior del conductor.

-Efecto Corona: Se debe a la ionización del aire que rodea al conductor. El efecto corona es función de dos elementos, el gradiente potencial en la superficie del conductor y la rigidez dieléctrica del aire en la superficie, valor que a su vez depende de la presión atmosférica y la temperatura.

2.6 Propiedades de los conductores

Las propiedades más influyentes en los conductores eléctricos son: la resistencia, la inductancia y la capacitancia, los cuales se analizarán a continuación.

2.6.1 Resistencia de los conductores

La resistencia consiste en la oposición natural que ofrece el conductor al paso del flujo eléctrico. La resistencia afecta principalmente al generar caída de tensión en los servicios que por él circulan y consumir parte de la potencia del sistema. Con respecto a las señales de comunicaciones, la resistencia afecta al producir atenuación en las señales, las cuales se disipan con la distancia.

La resistencia en los conductores se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.6.1.1)$$

Donde:

- ρ es la resistividad del material del conductor
- L es la longitud del conductor
- A es la sección del conductor

A altas frecuencias, la resistencia del conductor aumenta debido a que existe efecto piel (la distribución de corriente no es uniforme) y las señales se van por la superficie del conductor, disminuyendo el área efectiva del mismo. La resistencia del conductor a altas frecuencias se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{R_s}{\pi r} \quad (2.6.1.2)$$

$$R_s = \sqrt{(\pi f \mu) / \sigma} \quad (2.6.1.3)$$

Donde:

- R_s es la resistencia superficial del conductor
- r es el radio del conductor
- f es la frecuencia
- μ es la permitibilidad del medio
- σ es la conductividad del material del conductor

2.6.2 Inductancia en los conductores

La inductancia se produce debido a la variación de corriente en relación del tiempo que existe en los conductores. Depende de factores como la permeabilidad del medio, el área, la longitud y el número de vueltas del conductor. La reactancia inductiva es la resistencia que ofrece la inductancia al fluido eléctrico y es directamente proporcional a las frecuencias que por ella circulen.

La inductancia entre dos conductores se debe de considerar al transmitir señales debido a que entre ellos se generan campos magnéticos que influyen uno sobre el otro, adicionalmente a la oposición que genera este debido a las altas frecuencias teniendo una alta reactancia inductiva.

La inductancia (L) entre dos conductores colocados linealmente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \ln (D/a) \quad (2.6.1.4)$$

Donde:

- μ es la permitibilidad del medio
- D es la distancia entre conductores
- r es el radio del conductor

La reactancia inductiva (X_L) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$X_L = j(2\pi fL) \quad (2.6.1.5)$$

Donde :

-f es la frecuencia que circula por el conductor

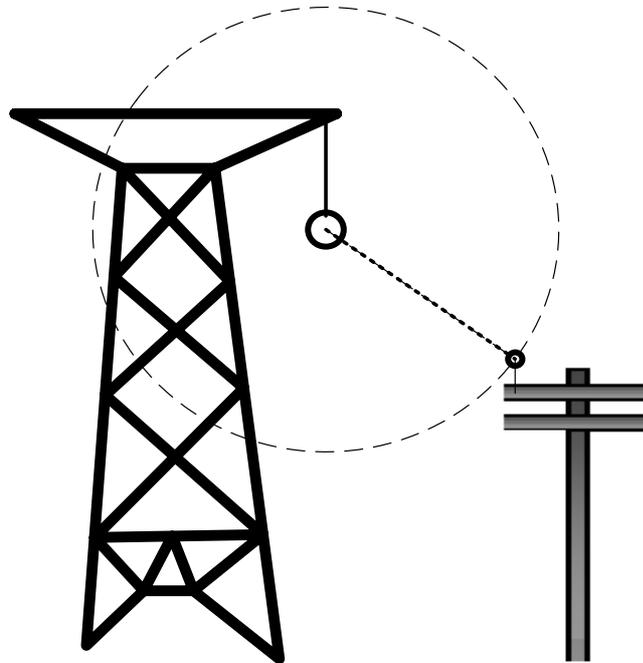
-L es la inductancia del conductor

2.6.3 Inductancia de una línea de transmisión

La inductancia de una línea de transmisión, a diferencia de las de una línea de una instalación interior, esta determinada por la cantidad de conductores y la posición que tienen las líneas, así como de el numero de hilos que componen los conductores. Debido a la alta cantidad de campo magnético y las corrientes que circulan por los conductores, así como la larga longitud de la línea, estos parámetros deben de considerarse si se desea enviar señales de comunicaciones por este medio.

Los efectos de una línea sobre otra, generalmente de alta a media o baja tensión (como el mostrado en la figura 4), combinados con la longitud de las mismas son de magnitudes considerables, las cuales afectan las señales y las limitan sobre todo en los anchos de banda, ya que en conductores interiores se pueden transmitir frecuencias en el orden de los Megahertz, mientras en las exteriores van en el orden de los Kilohertz.

Figura 4. Campo magnético de una línea de transmisión ejerciendo efecto sobre otra.



Fuente: Elaboración propia

2.6.4 Capacitancia en los conductores

La capacitancia se produce debido a la relación entre la carga y la diferencia de potencial de los conductores, teniendo aislantes de por medio. La capacitancia son factores que hay que considerar debido a que están relacionadas con campos eléctricos, los cuales interfieren en las señales de comunicaciones.

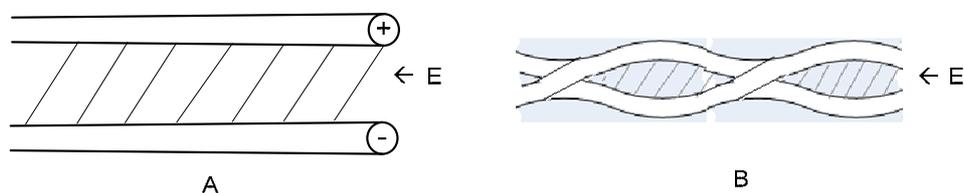
A diferencia de los campos magnéticos, el campo eléctrico es un tema más delicado de considerar al transmitir señales de comunicaciones, ya que los valores que se envían generan una cantidad de amperaje despreciable, por lo

que el campo magnético que ellas generan es muy poco. Sin embargo las señales tienen un valor de polaridad definido (positivo o negativo), y forman campos eléctricos entre los conductores con señales de polaridad opuesta, y esto genera interferencias por la misma intromisión de una señal en otra.

El tipo más común de interferencia que sucede es la diafonía, que es la atenuación generada de un conductor sobre otro debido al campo generado por estos. El fenómeno se presenta en los extremos de los conductores, ya que una señal parte con su máxima potencia, mientras la otra llega atenuada por todos los inconvenientes que encontró en el camino.

Esto se reduce utilizando conductores coaxiales o utilizando cables trenzados, sin embargo en los conductores eléctricos diseñados para potencia, esto no se puede hacer, por lo que estos fenómenos afectaran permanentemente las transmisiones de señales que se transmitan por el mismo medio, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. El campo eléctrico (E) entre dos conductores produce problemas a la señales que son transmitidos por ellos (A). Los campos se minimizan al trenzar los cables (B).



Fuente: Elaboración propia

La capacitancia (C) de dos conductores colocados linealmente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln (D/r)} \quad (2.6.4.1)$$

Donde:

- ϵ_0 es la permeabilidad del medio, que es el aire
- D es la distancia entre los conductores
- r es el radio del conductor

La reactancia capacitiva (X_c) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$X_c = -j / (2\pi fL) \quad (2.6.4.2)$$

Donde:

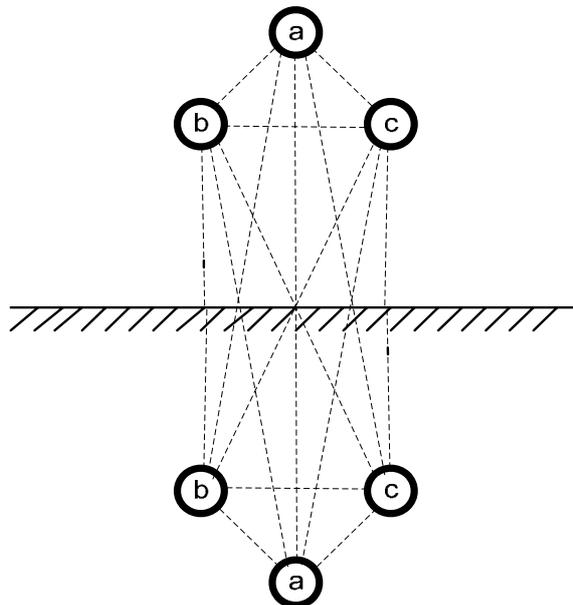
- C es la capacitancia de los conductores
- f es la frecuencia

2.6.5 Capacitancia de las líneas de transmisión

La capacitancia de las líneas de transmisión se debe a la alta cantidad de campos eléctricos que existen entre ellas provocada por la cantidad de conductores que viajan en las torres y postes, así como de la distancia y los aislantes que existe entre ellos. Debido a la elevada diferencia de potencial, que genera una cantidad grande de carga, también existe un efecto de capacitancia entre las líneas y el suelo, y la línea de neutral.

Las altas capacitancias permiten la libre circulación de altas frecuencias, ya que la reactancia capacitiva baja, y al estar en paralelo pueden hacer que alguna señal que viaje por el de frecuencia considerable tome otra trayectoria (dispersión) y no llegue a su destino final. Por consiguiente, no es recomendable pasar altas frecuencias cuando se tienen líneas con altos valores de capacitancia entre ellas. En la figura 6 se puede ver el efecto capacitivo de las líneas de transmisión, incluyendo el efecto que produce el suelo.

Figura 6. Efecto capacitivo entre líneas de transmisión, según el efecto de sus campos eléctricos, su ubicación y el efecto con el suelo.

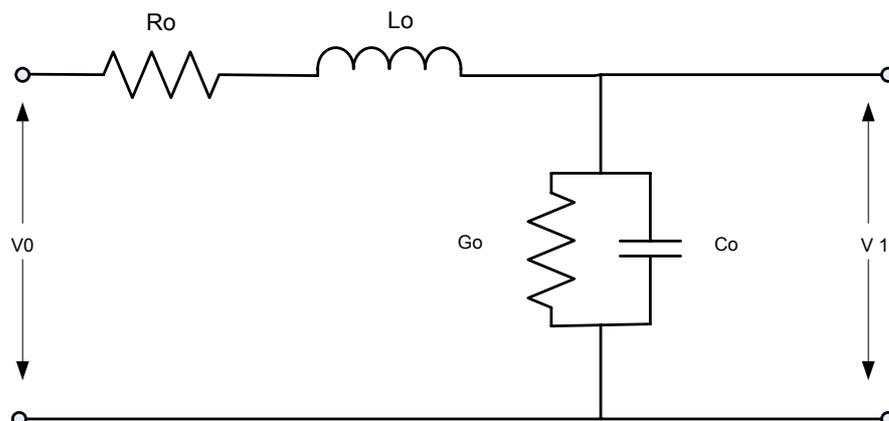


Fuente: Adaptado, William Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, página 78.

2.7 Parámetros de los conductores eléctricos

En base a los parámetros anteriores, las líneas de conducción eléctrica se pueden representar por la resistencia y la inductancia de la línea en serie, y la capacitancia entre otras líneas en paralelo junto con su conductancia. En la figura número 7 se muestra el diagrama equivalente de una línea de conducción, con los parámetros anteriormente mencionados.

Figura 7. Circuito equivalente de una línea de conducción eléctrica



Fuente: Elaboración propia

Donde:

- L_o es la inductancia de la línea
- R_o es la resistencia.
- C_o es la capacitancia entre las líneas

- G_0 es la conductancia de la capacitancia entre las líneas
- V_0 es el voltaje al inicio de la línea
- V_1 es el voltaje que llega a la carga después de las pérdidas en la línea.

3. ARMÓNICOS Y TRANSITORIOS

3.1 Definición de armónicos

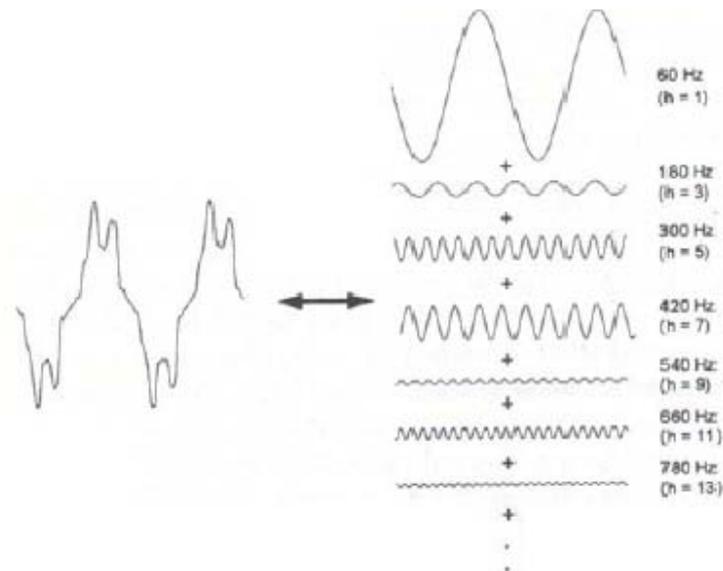
Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobre tensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa distribuidora de energía como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 hertz, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 hertz sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario.

La forma de onda existente esta compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. En la figura 8 se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) más una onda de frecuencia distinta.

Figura 8. Forma en que se genera una onda distorsionada con base a una onda fundamental más las ondas con un número de orden múltiplo de la frecuencia.



Fuente: www.prodies.com.mx

El término componente armónico o simplemente armónico (también llamado armónica) se refiere a cualquiera de las componentes sinusoidales mencionadas previamente, la cual es múltiplo de la fundamental. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en por ciento de la fundamental.

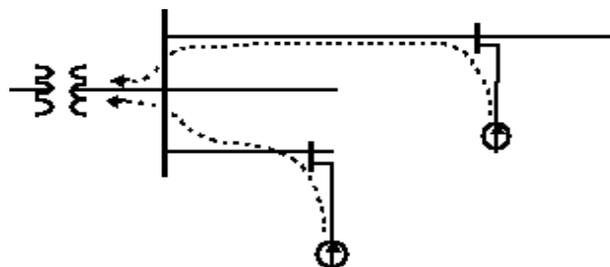
Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son amplitud y orden. La amplitud hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico. El orden hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz). Por principio, la fundamental f_1 tiene rango 1.

3.1.1 Trayectoria de los armónicos

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes armónicas siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia. Donde se tiene que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Así las armónicas fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso, esto se muestra en la figura numero 9.

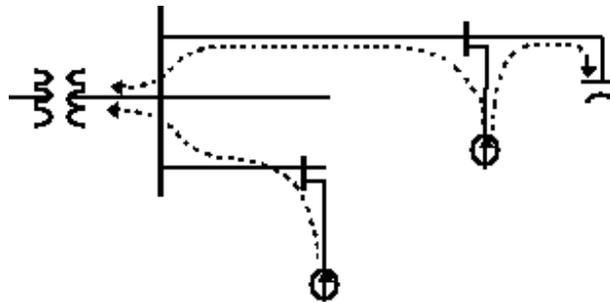
Figura 9. Armónicos fluyendo hacia un banco de transformadores



Fuente: elec.itmorelia.edu.mx

En cambio si al sistema anterior se le incluye un banco de capacitores como se muestra en la siguiente figura 10, da lugar a unas trayectorias distintas para las armónicas.

Figura 10. Armónicos fluyendo hacia un banco de transformadores y un banco de capacitores



Fuente: elec.itmorelia.edu.mx

3.1.2 Teoría de los armónicos

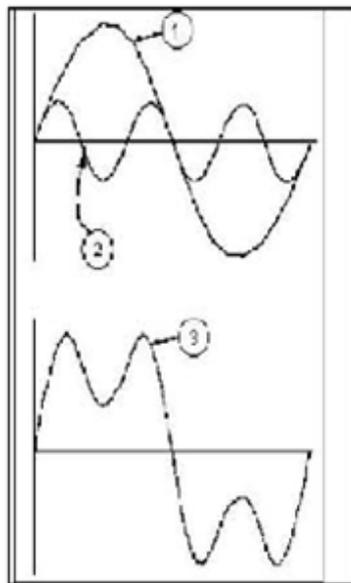
Cualquier onda no senoidal puede ser representada como la suma de ondas senoidales (armónicos) teniendo en cuenta que su frecuencia corresponde a un múltiplo de la frecuencia fundamental (en el caso de la red eléctrica es 50 o 60 Hz), según la relación:

$$V(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin (\omega_k t + \phi_k) \quad (3.1.2.1)$$

Donde:

- V_0 es el valor medio de $v(t)$ (onda en estudio)
- V_1 es el valor de la amplitud de la fundamental de $v(t)$
- V_k es el valor de la amplitud del armónico de orden k de $v(t)$

Figura 11. Resultante de la suma de ondas (3 da como resultado de sumar 1 y 2).



Fuente: <http://www.metrica.cl>

3.1.3 Origen de los armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia.

Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos.

Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia. El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia.

3.1.4 Contenido normal de los armónicos

Los armónicos crean problemas sólo cuando interfieren con la operación propia del equipo, incrementando los niveles de corriente a un valor de saturación o sobrecalentamiento del equipo o cuando causan otros problemas similares. También incrementan las pérdidas eléctricas y los esfuerzos térmicos y eléctricos sobre los equipos.

Los armónicos lo que generalmente originan son daños al equipo por sobre calentamiento de devanados y en los circuitos eléctricos, esta es una acción que destruye los equipos por una pérdida de vida acelerada, los daños se pueden presentar pero no son reconocidos que fueron originados por armónicos. El nivel de armónicos presente puede estar justamente abajo del nivel que pueden causar problemas, incrementar este valor límite puede presentarse en cualquier momento y pasar a un valor donde no se pueden tolerar.

3.2 Régimen transitorio

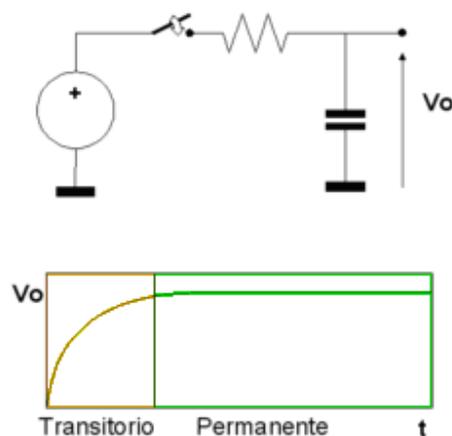
Se llama régimen transitorio a aquella respuesta de un circuito eléctrico que se extingue en el tiempo, en contraposición al régimen permanente, que es la respuesta que permanece constante hasta que se varía bien el circuito o bien la excitación del mismo.

La figura 12 se muestra un transitorio de tensión, que dura el tiempo de carga del condensador. Una vez cargado, la salida ya no varía. No existe un punto donde el régimen cambia, pasando de transitorio a permanente, sino que el transitorio tiende asintóticamente al régimen permanente. En la práctica se elige un valor arbitrario que depende de la aplicación de que se trate.

Desde el punto de vista del análisis de circuitos, la respuesta transitoria viene dada por la solución particular de la ecuación diferencial lineal que describe el circuito, mientras que el régimen permanente se obtiene de la solución de la homogénea. El amortiguamiento indica la evolución del transitorio, que se puede aproximar monótonamente al régimen permanente, como en la figura 12, o bien sufrir oscilaciones amortiguadas. Este último caso

puede ser peligroso pues el nivel de tensión o corriente puede superar los niveles nominales de funcionamiento.

Figura 12. Transitorio que aparece al cerrar el interruptor del circuito.



Fuente: books.google.com

Desde el punto de vista tecnológico, los transitorios son de gran importancia. Se producen en todos los circuitos (el encendido ya es un transitorio) y se suelen extinguir de forma natural, pero existen casos donde se deben limitar pues pueden provocar un mal funcionamiento o incluso la destrucción de algún componente. Debe prestarse atención a los transitorios principalmente en las siguientes situaciones:

-Encendido: Transitorios en las líneas de alimentación pueden destruir algún componente. En los amplificadores operacionales o circuitos Cmos puede presentarse el fenómeno de *Latch-up* (arqueo por contaminación en los circuitos impresos).

-Conmutación de inductancias: Relés, motores, relevadores electromagnéticos. Son peligrosos para el elemento de potencia que los gobierna. Se suelen proteger con diodos.

-Líneas de transmisión: En líneas de transmisión incorrectamente adaptadas se producen reflexiones que, en el caso de circuitos digitales, se comportan como transitorios. También estas líneas son susceptibles de captar ruidos de diversa procedencia que se acoplan a ellas llevando la señal fuera del margen de funcionamiento.

4. POWER LINE COMUNICATION (PLC)

4.1 Fundamentos del PLC

Power Line Communication (PLC) es una tecnología que permite ofrecer servicios de comunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica. Aunque no es tan reciente como puede suponerse, ha sido objeto de gran atención en los últimos años, y en la actualidad se están desarrollando pruebas y despliegues más o menos extensos en cerca de ochenta países es un síntomas claro de su potencial.

La idea esencial del PLC consiste en utilizar la línea eléctrica para la transmisión de datos, de forma que se puedan ofrecer servicios de telecomunicación basados en tecnología IP (*Internet Protocol*). La ventaja de este enfoque es evidente, al plantear la utilización de una infraestructura ya existente y de muy extensa cobertura, como es la red eléctrica, para la prestación de servicios de telecomunicaciones.

Existe cierta similitud con el caso de las tecnologías que aprovechan el par de cobre telefónico, inicialmente ideado para prestar el servicio de telefonía básica en banda vocal, como medio de transporte de Internet de alta velocidad, como lo es el *Digital Suscribe Line* (DSL). Así pues, tanto PLC como DSL utilizan infraestructuras ya desplegadas y muy extendidas.

PLC centra su atención en el tramo de baja tensión de la red eléctrica (el equivalente a la última milla o bucle de abonado en las redes telefónicas) por un motivo claro: las redes de acceso son el componente más costoso de las redes de telecomunicaciones, estimándose que tanto las inversiones como los gastos

operativos en red de acceso suponen más del 80% de los totales asociados a la red.

Por consiguiente, la transformación de las redes eléctricas de baja tensión en redes de acceso para prestar servicios de telecomunicaciones abre nuevas oportunidades de negocio, lo cual puede resultar muy atractivo para las empresas distribuidoras de electricidad.

La línea eléctrica es un medio muy ruidoso, cambiante y utilizado habitualmente para transmitir energía. La señal PLC comparte la línea eléctrica, si bien utiliza un rango de frecuencias que comprende entre los rangos de 3 a 148.5 KHz, últimamente ya se está desarrollando para que trabaje en frecuencias más altas proporcionando una mayor velocidad (entre los 1,6 y los 30 MHz) estando estos valores en la banda de HF (*high frequency*), también llamada onda corta.

Es interesante destacar que al día de hoy no hay estándares que seguir, aunque sí un grupo de sistemas (incompatibles entre ellos) caracterizados por la modulación de señal empleada. Las modulaciones utilizadas son las siguientes:

-DSSSM (*Direct Sequence Spread Spectrum Modulation*), que se caracteriza porque puede operar con baja densidad espectral de potencia.

-OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), que utiliza un gran número de portadoras con anchos de banda muy estrechos.

-GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), que optimiza el uso del ancho de banda.

De todos ellos, el sistema de modulación más extendido es OFDM, utilizado también en estándares IEEE para redes de área metropolitana inalámbricas, e incluido dentro de las especificaciones para la radiodifusión de televisión digital terrestre.

Este sistema multiportadora es eficiente y flexible para trabajar en un medio como la red eléctrica, ya que el rango espectral queda dividido en *slots*, cuyo ajuste permite que los equipos se adapten dinámicamente a las condiciones del medio, potenciando aquellas frecuencias donde el ruido es menor y anulando el uso de frecuencias donde el ruido es elevado.

La capacidad de transmisión del PLC también varía en función del fabricante, pero el máximo suele establecerse en los 45 Megabits por segundo (27 Megabits en el sentido red-usuario, y 18 Megabits en el sentido usuario-red). Sin embargo chips de segunda generación de desarrollo reciente han elevado el límite por encima de los 130 Megabits lo que permite al PLC competir con ventaja con otros sistemas de comunicación de banda ancha. Esto es en los sistemas de distribución externos.

En los sistemas eléctricos internos, la capacidad de transmisión que suministran los equipos se encuentran en los valores de 14 Megabits, 85 Megabits y actualmente ya se tiene en el mercado dispositivos que pueden transmitir hasta 200 Megabits por segundo.

Al ser la infraestructura eléctrica un medio ruidoso, no sólo hay que afrontar la atenuación de la señal, sino eventos tales como el arranque y parada de equipos, interruptores de distinto tipo, algunos con emisión de radiaciones atenuadas a los pocos metros, pero otros, como aquellos que ponen en marcha

ascensores y aparatos de aire acondicionado, con señales emitidas de mucha mayor intensidad.

Todas estas interferencias deben superarse utilizando diversos mecanismos, siendo el primero de ellos el recurso a las ya mencionadas posibilidades de ajuste espectral que la capacidad multiportadora del PLC ofrece. Por otra parte pueden utilizarse filtros que eliminen ruidos parásitos por toda la red y que aíslen equipos problemáticos y protejan servicios que puedan ser interferidos.

4.2 Normalización

Pese a la ausencia de estándares vigentes, la tecnología PLC ocupa la actividad de diversos grupos de trabajos en organismos como ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), que en 1999 aprobó la creación de un proyecto llamado EP PLT (*European Project Powerline Telecommunications*) con el objetivo fundamental de desarrollar estándares de alta calidad para proporcionar servicios de voz y datos a los usuarios finales a través de las redes eléctricas.

El EP PLT vela para que la cooperación y relación con otros organismos iniciativas relacionados, como son los casos de ERM (*ETSI Project for Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters*) y CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) esté claramente definida.

Es importante destacar que la normalización hacia la que se tiende en Europa pasa por contemplar desde el comienzo las dos vertientes de la

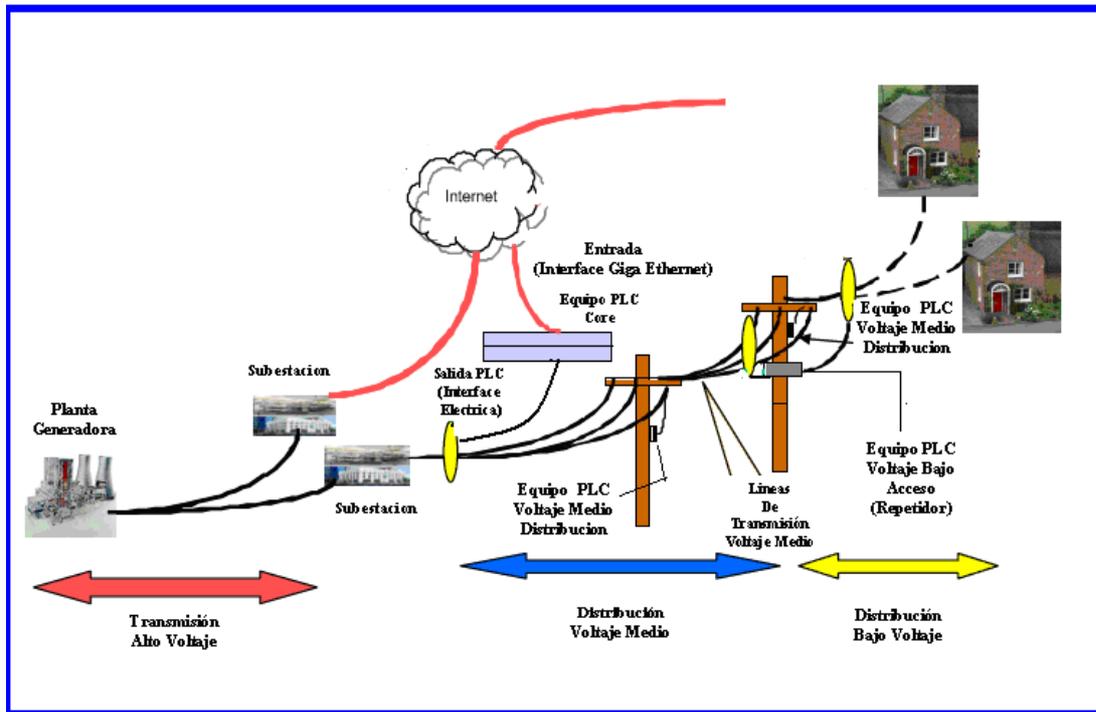
tecnología PLC: acceso a Internet (*outdoor*), que es lo que se viene llamando “Internet eléctrica”, y solución interior o LAN (*indoor*). Para que estas dos vertientes puedan coexistir se divide el espectro PLC en dos rangos de frecuencias: el primero de ellos comprende desde los 3 hasta los 148.5 KHz y se dedica al acceso, mientras el rango espectral comprendido entre 1.6 y 30 MHz se asigna a las aplicaciones indoor.

PLC Forum es una asociación internacional que representa los intereses de fabricantes y otros organismos activos en el campo de PLC en todas sus vertientes. Fue creado a comienzos de 2000 y desde entonces el número de miembros e invitados permanentes asciende a más de 50. A través de grupos de trabajo y la celebración de asambleas también tiene entre sus objetivos la creación de un marco normativo y regulatorio para el PLC.

Para finalizar, conviene hablar de *Home Plug*, que es un estándar de facto que está desarrollándose en EEUU y es promovido por la *Home Plug Powerline Alliance*, organización compuesta por un grupo numeroso de empresas en su mayoría estadounidenses que han adquirido el compromiso de crear especificaciones que promuevan y aceleren la demanda de esta tecnología. Este estándar es utilizado para redes *indoor*.

Las redes *outdoor* son aquellas donde se envían datos por líneas de transmisión de medio y bajo voltaje (13.8 KV y 120/240 V). Las redes *indoor* consiste en enviar la señalización por la instalación eléctrica domiciliar, sobre los conductores normales (calibres 16, 14, 12, etc.) con voltajes 120/240 V. En la figura 13 se da el diagrama básico de cómo transmitir el servicio eléctrico por las líneas de transmisión de medio y bajo voltaje.

Figura 13. Diagrama básico de cómo transmitir una señal de comunicaciones con tecnología PLC por el sistema de distribución eléctrica



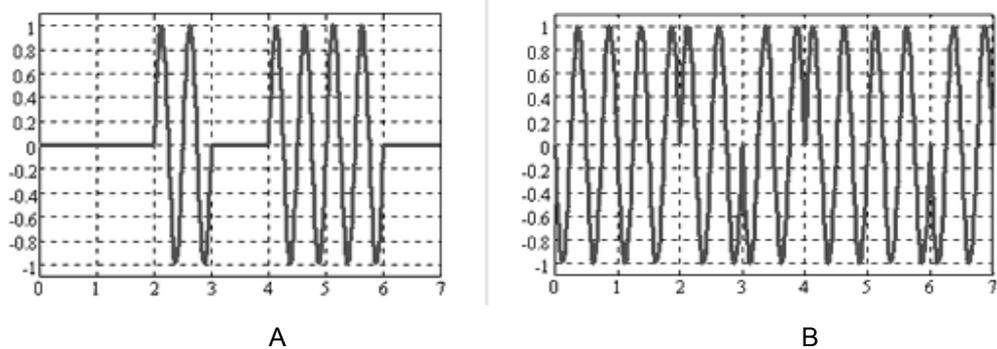
Fuente: Adaptado, <http://www.powerlinenetworking.co.uk/content/view/53/66/>

4.3 Modulación OFDM

Las redes PLC actualmente están utilizando la modulación denominada OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales), es una modulación que consiste en enviar la información modulando en QAM (Modulación por Amplitud en Cuadratura) o en PSK (Modulación por Desplazamiento de Fase), un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias. En QAM un “1” es cuando se detecta cualquier tipo de onda, y un “0” cuando no hay ningún tipo de señal. En PSK, un “1” es cuando la onda lleva la señal en

un sentido, y un "0" es cuando la señal cambia de ángulo de movimiento (corrimiento de fase).

Figura 14. Modulación QAM (A) y PSK (B)

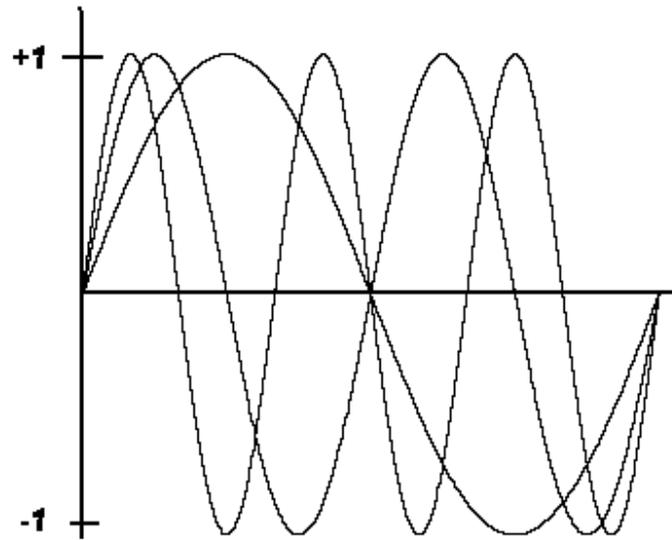


Fuente: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=10>

La modulación OFDM es muy robusta frente a las múltiples rutas (*multi-path*), que es muy habitual en los canales de comunicación, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de radio frecuencias. Debido a las características de esta modulación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes que llegan al receptor, por lo que existe la posibilidad de crear redes de comunicación de frecuencia única sin que existan muchos problemas de interferencia.

OFDM utiliza 1280 ondas portadoras, y teóricamente es capaz de modular hasta 7.25 bits por segundo por cada hertz transmitido. La siguiente figura muestra teóricamente como OFDM funciona, enviando varias ondas de diferentes frecuencias, superpuestas unas contra las otras, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Modulación OFDM



Fuente: Elaboración propia

5. RUIDO ELÉCTRICO

5.1 Ruido en los sistemas eléctricos

Los ruidos eléctricos básicamente son corrientes o tensiones interferentes e indeseadas en aparatos eléctricos o sistemas. El ruido eléctrico, en general simplemente denominado ruido, tiene un importante efecto en cualquier red eléctrica que se utilice para recoger, transmitir o elaborar o presentar información. En tales sistemas, las señales deseadas que transmiten la información pueden ser enmascaradas o distorsionadas por el ruido.

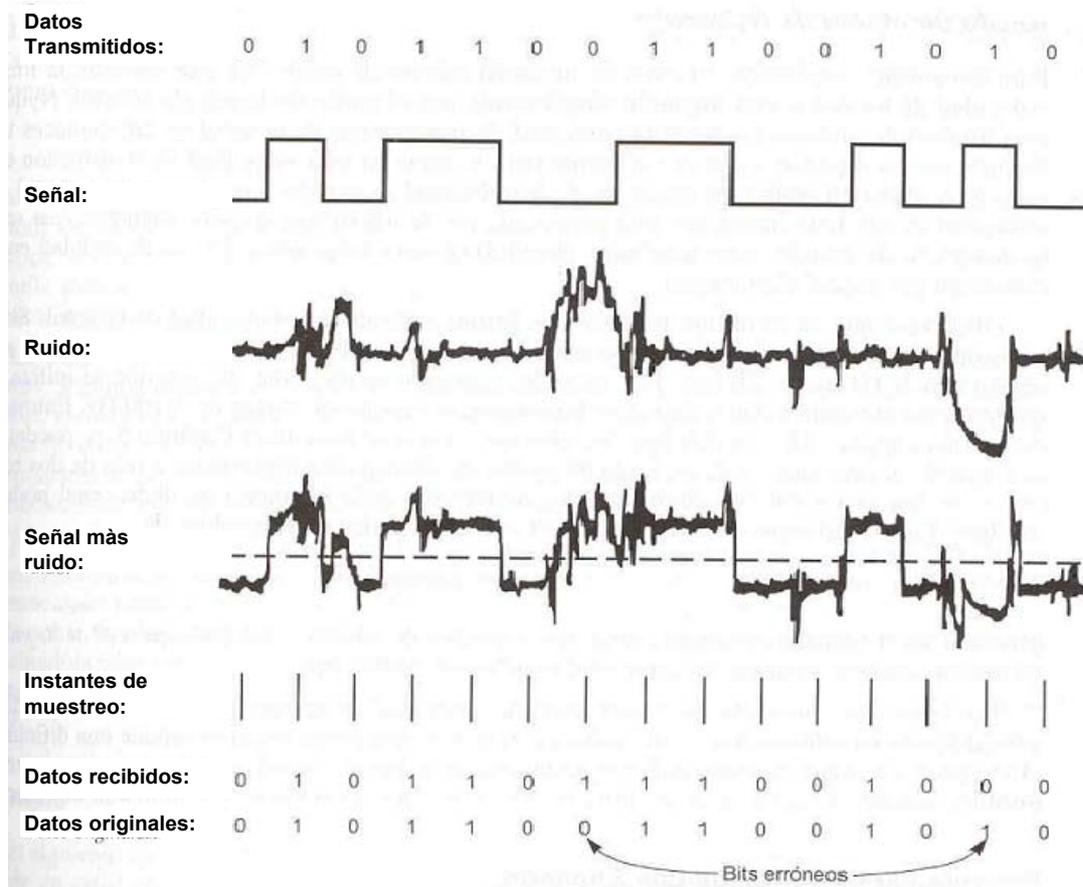
El ruido se puede originar ya sea externamente al sistema, en el cual aparece debido a los campos eléctricos y magnéticos que hay en el ambiente, o deberse a la interferencia de las cargas eléctricas conectadas en los circuitos, como motores eléctricos, equipos electrónicos o sistemas de iluminación, y también por compartir los mismos medios de transmisión como los son las líneas de conducción y los transformadores de potencia.

El ruido se puede clasificar convenientemente en ruido fluctuante y no fluctuante. Ruido fluctuante se define como aquel cuya intensidad varia (fluctúa) en el tiempo. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias. En algunos casos puede presentar cierta regularidad estadística. El ruido no fluctuante es generalmente el resultado de radiación de otros equipos eléctricos, de acoplamientos accidentales con otros sistemas o bien de oscilaciones parásitas producidas en el propio circuito.

El ruido afecta las señales de comunicaciones debido a que las señales inducidas se suman a las señales transmitidas, afectando su forma y produciendo una distorsión en la onda original, y puede dar como resultado

información errónea al momento de decodificar la señal. En la figura 16 se puede apreciar una señal de forma de onda cuadrada, la cual transmite un “1” cuando hay voltaje, y un “0” en la ausencia de este. Al sumar esta señal ante un ruido, se puede observar que el ruido enmascara unos sectores de la señal y confunde los parámetros recibidos. Esto es lo que se denomina errores en las señales, las cuales son causadas por los ruidos.

Figura 16. Efectos del ruido en una señal digital



Fuente: <http://www.esi.uclm.es>

5.2 Clases de ruido

Según su origen se puede clasificar al ruido eléctrico en las siguientes categorías:

- Ruido térmico
- Ruido de intermodulación
- Ruido impulsivo
- Ruido gaussiano
- Ruido correlacionado
- Ruido blanco

5.2.1 Ruido térmico

Se debe a la agitación térmica de los electrones dentro del conductor y es función de la temperatura. Este tipo de ruido se encuentra presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión. El ruido térmico no se puede eliminar por lo que representa un límite superior a las prestaciones que pueden alcanzarse con los sistemas de comunicaciones. Es de tipo fluctuante.

5.2.2 Ruido de intermodulación

Cuando señales de diferentes frecuencias comparten un mismo medio de transmisión puede producirse un ruido de intermodulación. Este tipo de ruido genera señales a frecuencias que son suma o diferencia de las dos frecuencias originales, o múltiplos de éstas. Por ejemplo si se tienen dos frecuencias f_1 y f_2 la mezcla de las mismas puede producir energías a frecuencias $f_1 + f_2$ y éstas frecuencias pueden interferir con una señal de frecuencia $f_1 + f_2$.

El ruido de intermodulación se produce cuando existe alguna "no linealidad" en el transmisor, receptor o en el sistema de transmisión. Estos sistemas, normalmente, se comportan como sistemas lineales, es decir, la salida es igual a la entrada multiplicada por un valor constante. En cambio en los sistemas no constantes la salida es una función más compleja de la entrada. Estas componentes pueden aparecer a causa de un funcionamiento incorrecto de los sistemas o por el uso de excesiva energía en la señal.

5.2.3 Ruido impulsivo

El ruido impulsivo es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y amplitud relativamente grande, en contraste con los tipos de ruidos anteriores que son razonablemente predecibles y de magnitud constante. Estos pulsos se generan por diversas causas, por ejemplo son generados perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas o fallos y defectos en los sistemas de comunicación. También se produce cuando hay regímenes transitorios. Es de tipo no fluctuante.

5.2.4 Ruido gaussiano

Estrictamente hablando, el ruido gaussiano es únicamente el que presenta una distribución de Gauss, independientemente de que exista una correlación del ruido en el tiempo o no.

5.2.5 Ruido correlacionado

El ruido correlacionado esta presente como un resultado directo de la presencia de distorsiones armónicas. Las distorsiones armónicas son los múltiplos no deseados de la onda seno de frecuencia simple que se crean cuando la onda seno se amplifica en un dispositivo no lineal. La distorsión de amplitud es otro nombre para la distorsión armónica. El termino distorsión de amplitud se utiliza en el dominio del tiempo y el y armónico para el dominio de la frecuencia.

Existen varios grados u ordenes de distorsión armónica. La distorsión armónica de segundo orden es la relación de la amplitud RMS de la frecuencia de la segunda armónica a la amplitud RMS de la frecuencia fundamental. A la relación de las amplitudes RMS combinadas de las armónicas superiores con la amplitud RMS de la frecuencia fundamental se le llama la distorsión armónica total (THD).

5.2.6 Ruido blanco

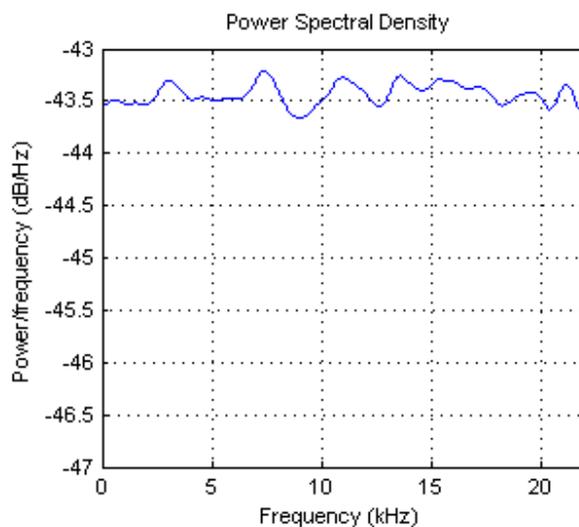
El ruido blanco es una señal aleatoria que se caracteriza porque sus valores de señal en dos instantes de tiempo diferentes no guardan correlación estadística. Como consecuencia de ello, su densidad espectral de potencia es una constante. Esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas tienen la misma potencia

5.3 Densidad espectral

En matemáticas y en física, la densidad espectral (*spectral density*) de una señal es una función matemática que nos informa de cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de dicha señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada, es decir, su espectro.

La definición matemática de la densidad espectral (DE) es diferente dependiendo de si se trata de señales definidas en energía, en cuyo caso hablamos de densidad espectral de energía (DEE), o en potencia, en cuyo caso hablamos de densidad espectral de potencia (DEP). Aunque la densidad espectral no es exactamente lo mismo que el espectro de una señal, a veces ambos términos se usan indistintamente, lo cual, en rigor, es incorrecto.

Figura 17. Gráfica densidad espectral de potencia (DEP)



Fuente: www.wikipedia.org

Para el caso de la densidad espectral en base a la energía (DEE) se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_{xx}(f) = |X(f)|^2 \quad (5.3.1)$$

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) df \quad (5.3.2)$$

Donde

- S_{xx} es la densidad espectral de energía (DEE)
- $X(f)$ es la transformada de la energía en función de la frecuencia
- E es la energía

Para el caso de la densidad espectral en base a la potencia (DEP) se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_{xx}(f) = \text{TF} \{R_{xx}(\tau)\} \quad (5.3.3)$$

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) df \quad (5.3.4)$$

Donde :

- S_{xx} es la densidad espectral de potencia (DEP)
- TF significa que se le está aplicando la transformada de Fourier a la función de autocorrelación de la señal $R_{xx}(\tau)$
- P es la potencia.

6. CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS

6.1 Teorema de Nyquist

A finales de los años 20, Harry Nyquist y Ralph Hartley desarrollaron una serie de ideas fundamentales relacionadas con la transmisión de la información, particularmente en el contexto del telégrafo como sistema de comunicaciones. En aquel entonces, estos conceptos eran avances de gran alcance individualmente, pero no eran parte de una teoría exhaustiva.

En los años 40, Claude Shannon desarrolló el concepto de capacidad de un canal, basado en parte en las ideas de Nyquist y Hartley, y después formulando una teoría completa de la información y de su transmisión. Las ideas de Nyquist eran puramente empíricas, pero sirvieron como punto de partida para poder definir la cantidad de bits que se pueden transmitir en determinadas frecuencias.

En 1927, Nyquist determinó que el número de pulsos independientes que podían pasar a través de un canal por unidad de tiempo estaba limitado a dos veces el ancho de banda del canal:

$$p \geq 2B \quad (6.1.1)$$

Donde p es la cantidad de pulsos (en pulsos por segundo) y B es el ancho de banda (en hertz). Trasladado a términos de comunicaciones, lo anterior indica que por cada hertz de frecuencia se transmitirán dos pulsos

(bits) por lo cantidad de bits es el doble de la frecuencia que se tenga en el sistema, según este teorema.

6.2 Teorema de Shannon-Hartley

El teorema de Shannon-Hartley es una aplicación del teorema de codificación para canales con ruido del típico caso de un canal de comunicación continuo en el tiempo que sufre un ruido gaussiano. El teorema establece para la capacidad del canal, una cuota de la máxima para la cantidad de datos digitales sin error que pueden ser transmitidos sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico con la presencia de la interferencia del ruido.

Se asume que se limita la potencia de la señal y que el proceso del ruido gaussiano es caracterizado por una potencia conocida o una densidad espectral de potencia. El teorema fue creado por Claude Shannon, un Ingeniero Electricista y Matemático, quien lo dio a conocer en la década de 1940, tomando como base los estudios anteriores de Harry Nyquist y Ralph Hartley. El teorema de Shannon se expresa de la siguiente forma:

$$C_h = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (6.2.1)$$

Donde:

- B es el ancho de banda del canal (Hz).
- C es la capacidad del canal (tasa de bits de información en bps).
- S es la potencia de la señal útil (w, mw, μ w).

- N es la potencia del ruido presente en el canal (w, mw, μ w), que trata de enmascarar a la señal útil.

Años más tarde se logró desarrollar una forma más completa de expresar la tasa de transmisión de datos con respecto a la frecuencia y el ruido es la siguiente:

$$C_h = \int_{f_0}^{f_1} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df \quad (6.2.2)$$

Donde:

- C_h es la capacidad del canal (tasa de bits de información por segundo, bps)
- f_0 y f_1 es el ancho de banda (B) de las frecuencias del canal, (Hz)
- $S(f)$ es el espectro de la potencia de la señal útil, (w, mw, etc.)
- $N(f)$ es el espectro de la potencia del ruido presente en el canal, (mw, μ w, etc.) que trata de enmascarar a la señal útil.

6.3 Relación señal-ruido

Se conoce como “relación señal-ruido” (representado como SNR) a la división de la potencia de la señal que se desea transmitir dentro de la potencia de la señal de ruido la cual hace interferencia. Se mide en Decibelios (dB) y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SNR = 10 \log \frac{S}{N} \quad [dB] \quad (6.3.1)$$

Donde:

-S es la potencia de la señal

-N es la potencia del ruido

La relación señal-ruido SNR también se puede calcular mediante la relación de los cuadrados de los valores eficaces de la señal que se desea transmitir y de la señal de ruido la cual hace interferencia:

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{A_s^2}{A_n^2} = 20 \log \frac{A_s}{A_n} \text{ [dB]} \quad (6.3.2)$$

Donde:

-As es el valor RMS de la amplitud de la señal

-An es el valor RMS de la amplitud del ruido

Si se conoce la relación señal-ruido en Decibelios, el valor de la relación S/N de la ecuación de Shannon se puede calcular de la siguiente forma:

$$\frac{S}{N} = 10^{(\text{SNR}/10)} \quad (6.3.3.)$$

7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Lo que se requiere es poder determinar con mayor exactitud los diferentes problemas y diversas situaciones que acontecen al transportar señales de comunicaciones por medio de las redes eléctricas, ya sea de distribución como el que hay en los postes de energía eléctrica, como en los conductores interiores de las instalaciones residenciales, comerciales e industriales.

Los problemas son generados debido a que el sistema eléctrico no es un medio de comunicación limpio, desde el punto de vista de transmisión de señales, sino que soporta cualquier situación eléctrica que se genere a través de él, lo cual ocasiona distorsiones en las ondas transmitidas, incluyendo las señales de comunicaciones.

Armónicos debido a cargas no lineales, transitorios, circuitos con diferentes fases, inductancias, capacitancias, corrientes parasitas y autoinducidas, descargas electro atmosféricas, sobre voltajes y sobre corrientes debido a fallas en el sistema, afectan significativamente las señales de comunicaciones las cuales manejan ondas que varían en el orden de los Milivolts a unos pocos Volts como referencia de transmisión y utilizan frecuencias en el orden de los Kiloherztz y Megahertz.

Las señales de referencia de comunicaciones se suman a los ondas que hay en la línea, saliendo desde un dispositivo que logra convertir la señal digital a la señal PLC (modem PLC) hasta otro dispositivo similar, el cual filtra las señales del voltaje de potencia sinusoidal y rescata la señal de comunicaciones.

Sin embargo, en el trayectoria de este circuito, los componentes anteriormente mencionados causan problemas en la señal los cuales afectan la forma de la misma ocasionando problemas que se ven reflejados en una degradación en la transmisión de señales.

Adicionalmente, los propios problemas que generan los conductores eléctricos, los cuales no son diseñados para la transmisión de señales de comunicaciones, hacen que la comunicación sea aún más complicada y se necesiten hacer todavía muchos estudios y consideraciones antes de implementar un sistema de comunicaciones utilizando el sistema de transmisión de potencia.

Los problemas en las señales de comunicación se deben específicamente a todos los dispositivos conectados en el sistema eléctrico, sobre todo los que están ubicados en las instalaciones de los usuarios, que al final es la carga que llega a las líneas de distribución y los transformadores de potencia de medio a bajo voltaje, que son los ambientes en que las señales transitan, por lo que es necesario analizar cada tipo de carga ubicadas desde el usuario final, hasta su llegada al transformador.

8. ANTECEDENTES

Actualmente, tratar de implementar un sistema de comunicaciones por medio de un sistema eléctrico, tiene más situaciones en contra que a favor debido a que los resultados muchas veces no son los esperados. Se tiene la ventaja principal de tener la infraestructura lista como lo son las líneas de distribución y las instalaciones eléctricas, pero estos medios se encuentran ya ocupado por diversas formas de transmisión de voltajes y corrientes, que generan problemas a las señales de comunicaciones.

Las señales de comunicación PLC no pueden atravesar diversos equipos como lo son los de regulación y protección (tales como UPS, supresores de picos, protectores de línea, etc.) debido a que consideran la señales de comunicaciones como ruido y la filtran de las ondas sinusoidales de voltaje, siendo esta otra limitante para las comunicaciones.

Tampoco se puede transmitir la señal entre los devanados primario y secundario de un transformador de potencia, y se ve una degradación grande de las señales cuando se mezclan con corrientes no lineales. También debido a los pocos estándares oficiales que existen, los equipos PLC de diferentes fabricantes se comportan de forma diferente en un ambiente similar, e inclusive muchas veces ni siquiera logran comunicarse entre ellos.

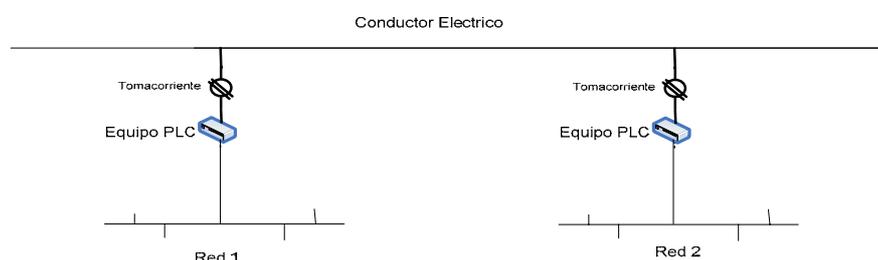
9. EQUIPOS Y AMBIENTES DE FUNCIONAMIENTO

9.1 Determinación de parámetros en ambiente ideal

Como primer paso, se analizará un sistema de comunicaciones que utiliza un sistema eléctrico para transmitir de forma ideal, es decir, suponiendo que en la red eléctrica únicamente existen los dispositivos de comunicaciones, sin cargas eléctricas de otro tipo con las cuales convivir. Al tener el análisis en ambiente ideal, se conectarán las diferentes cargas que existen en una red eléctrica y se analizará como estas interfieren en la señal de datos, y a partir de aquí se podrán analizar los diferentes problemas que se presentan.

En la figura 18 se puede ver una conexión de equipos de comunicaciones en un ambiente ideal.

Figura 18. Conexión de equipos PLC en un circuito ideal, dedicado únicamente para la transmisión de las señales de comunicaciones



Fuente: Elaboración propia

Lo que se pretende es determinar bajo que circunstancias es recomendable utilizar la red eléctrica para transportar señales de comunicaciones y conocer más a fondo los problemas que puedan existir, y plantear un análisis profundo para tomarlo en cuenta en diseños de diferentes servicios de comunicaciones que puedan transmitirse por los sistemas eléctricos (datos, Internet y telefonía), con base a los equipos que tienen conectados.

A continuación se analizarán los diferentes componentes que se necesitan para poder transmitir señales de comunicaciones por la red eléctrica.

9.1.1 Señales de comunicaciones

Son aquellas que sirven para que varios dispositivos puedan establecer una transmisión de información coherente y entendible. Estas pueden presentarse de forma analógica o digital y pueden obedecer a diferentes patrones y estándares. Las más utilizadas para la transmisión de datos y telefonía en redes, usan el estándar IEEE 802.3, denominando *Ethernet*.

Eléctricamente, una señal *Ethernet* está compuesto por una señal digital que comprende valores entre 385 Milivoltios como valor mínimo de recepción y 2.2 Volts como valor máximo de transmisión, en forma de onda cuadrada, de forma ideal, sin embargo debido a las atenuaciones que sufre en el medio, la onda sufre distorsiones (ruido y pérdidas en los conductores).

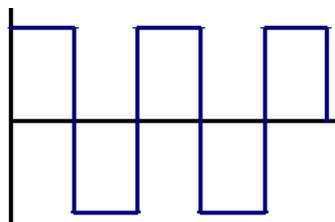
Como resultado se tiene una onda distorsionada, pero de la cual se pueden hacer aproximaciones en sus valores promedios, y sobre todo que los valores pueden variar (figuras 19 y 20). Sin embargo, lo que se trata de obtener

es que la señal proporcione la información que trae y para eso se utilizan diferentes sistemas de codificación.

Se pueden tener varios parámetros para la codificación, como por ejemplo tomar para el valor de “1” una continuidad de voltaje positivo, y de “0”, una continuidad de voltaje negativo, o tomar como valor de “1” bit la presencia de una señal y como “0” la ausencia de esta, o como “1” el ángulo de fase de la señal y como “0” el cambio de ángulo de fase. Se toma la cantidad de bits que se envíen en cierto tiempo como parámetro de velocidad de transmisión.

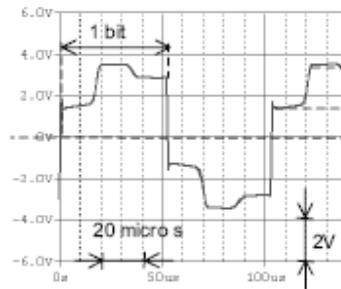
Para poder transmitir a más bits, los equipos incrementan la frecuencia de transmisión, y para poder transmitir altos valores de esta depende del medio de transmisión (sobre todo, que éste pueda soportar las frecuencia). *Ethernet* transmite 10 Megabits por segundo a frecuencias de 5 a 10 MHz, y *Fastethernet* transmite 100 Megabits a frecuencias de hasta 62.5 MHz, que son las interfaces que traen los equipos PLC.

Figura 19. Forma de una señal de comunicaciones de forma ideal



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Forma de una señal de comunicaciones de forma real, distorsionada por la transmisión y las atenuaciones en el medio.



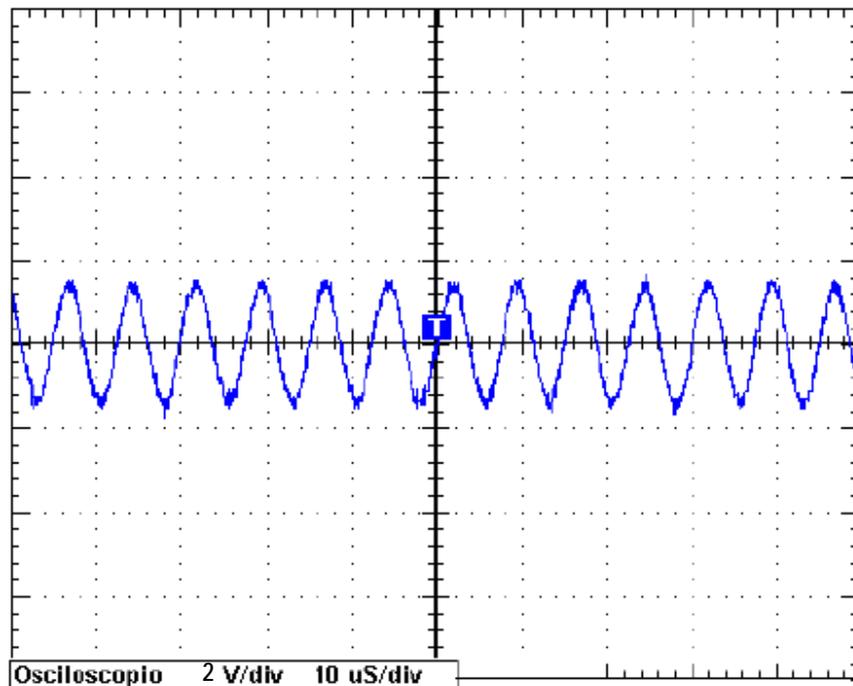
Fuente: <http://piers.mit.edu/piersonline>

9.1.2 Señales PLC

La señal PLC se deriva de transformar una onda digital, que puede ser como la que es producida por una red *Ethernet* (estándar IEEE 802.3), la cual esta compuesta por una señal cuadrada, a una señal sinusoidal de alta frecuencia (en el rango 3 a 148.5 KHz, y últimamente ya se ha desarrollado entre 1.6 y 30 MHz). Utilizan en la mayoría de casos (depende del fabricante) señales que tienen como valor pico 2 Volts.

La señal es transmitida por los circuitos del sistema eléctrico con voltajes AC de baja frecuencia (60 Hz), la cual se suman entre si y conviven en la red eléctrica. Una portadora de señal PLC tiene la forma mostrada en la figura número 21.

Figura 21. Forma de una portadora de señal PLC

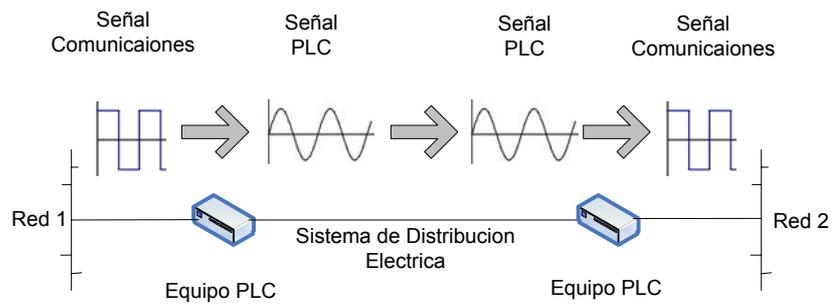


Fuente: Adaptado, <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

9.1.3 Equipos PLC

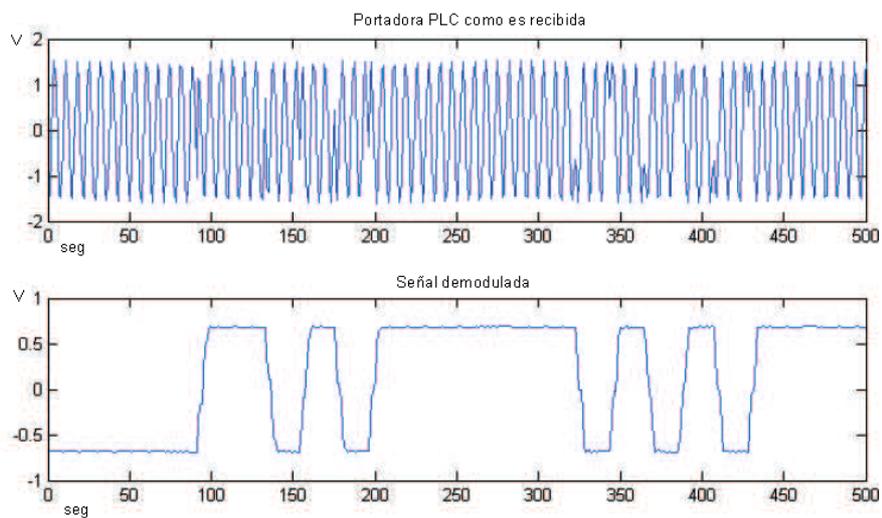
Los equipos PLC son los dispositivos encargados de tomar las señales de comunicaciones y las convierten a señal PLC, enviándola por la red eléctrica y toman también son los encargados de agregar las señales PLC con los voltajes eléctricos, así como de filtrar la señal del voltaje cuando estos las reciben de otros equipos similares. Cada equipo genera varias ondas (portadoras) a diferentes frecuencias para poder enviar la información con mayor rapidez, utilizando modulación OFDM. La secuencia de funcionamiento es la que se muestra en las figuras 22 y 23.

Figura 22. La señal de comunicaciones entra a un equipo PLC, la cual le transforma la forma de onda y la frecuencia para poder transmitirla por el sistema eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Desmodulación de una señal PLC a la señal de comunicaciones. En este caso, usa desmodulación PSK.



Fuente: <http://focus.ti.com/lit/an/spraad5/spraad5.pdf>

9.1.4 Suma de señales

Al tener un sistema de comunicaciones transportado por una red de servicio eléctrico, se tiene que se suma una señal de amplitud alta y baja frecuencia (voltaje de corriente alterna) y una de baja amplitud y alta frecuencia (señal de comunicaciones). Esto es en un ambiente ideal, suponiendo que no existe ningún otro tipo de carga en la red eléctrica que introduzca otro tipo de onda al sistema (Figura 24).

Figura 24. Suma de una señal amplitud grande y frecuencia baja con una de amplitud pequeña y frecuencia alta, da como resultado una onda con frecuencia mayor y deformaciones en las crestas.



Fuente: http://www13.adc.com/adc/site_images/ESP.pdf

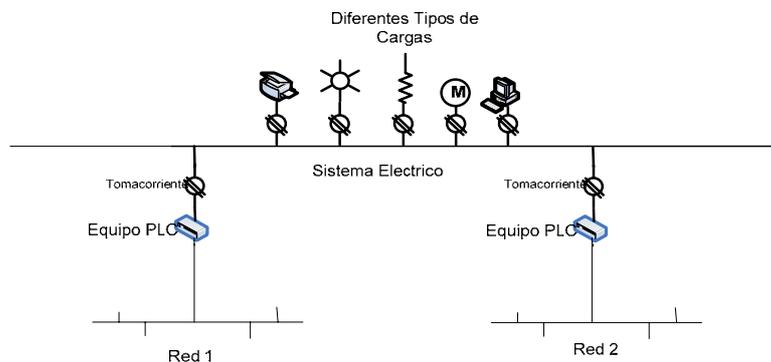
9.2 Servicio en ambiente real

El ambiente real a la hora de transportar señales de comunicaciones por la red eléctrica, es que en esta existe todo tipo de servicios, conexiones y equipos que generan en la misma corrientes y voltajes transitorias y no lineales, las cuales afectan de gran manera las señales de comunicaciones ya que estas

tienen una baja potencia, poca amplitud y alta frecuencia, originando una degradación en las mismas y como consecuencia en los servicios que prestan.

Esta degradación se puede ver reflejada en una mala calidad de transmisión y velocidades de transferencia, en el caso de los datos, o mala calidad de audio y fenómenos como el “*delay*” (retardo en el arribo de paquetes) o el “*jitter*” (los paquetes llegan antes o después de lo esperado), en el caso de la telefonía o el video.

Figura 25. Ambiente real en el cual se trasmite una señal de comunicaciones: un circuito con todo tipo de cargas.



Fuente: Elaboración propia

9.2.1 Transmisión de servicios en tiempo real

Los servicios en tiempo real son aquellos que deben de tomar efecto en el momento en que se realizan. Por ejemplo, la telefonía es un servicio en tiempo

real, ya que los paquetes deben de llegar del transmisor al receptor con el menor *delay* posible, sino la comunicación no se puede realizar. La transmisión de datos no se considera un servicio en tiempo real ya que si demoran los paquetes unos segundos en llegar del transmisor al receptor, no ocurre ningún efecto adverso que afecte la comunicación.

Algunos servicios en tiempo real, como la telefonía específicamente, envían paquetes de bits muy pequeños por lo que necesitan un ancho de banda pequeño para funcionar. Los datos, por ejemplo, que no son necesarios que sean en tiempo real, envían paquetes de bits grandes, por lo que necesitan anchos de banda grandes para poder transmitir.

Lo anterior es uno de los más grandes problemas que hay en las redes tradicionales, ya que tanto los paquetes de datos y telefonía viajan por el mismo medio, quedando los paquetes de bits pequeños en medio de los paquetes grandes, teniendo retardos en el arribo de los paquetes y por consiguiente se escucha la voz con una mala calidad. Para arreglar estos problemas, en las redes se utilizan tecnologías como las de QoS (Calidad de Servicio), las cuales son complicadas de implementar y se necesitan equipos costosos que las soporten, o en su defecto, se utilizan medios de transmisión separados para datos y telefonía.

En redes *Ethernet*, los paquetes de voz utilizan anchos de banda que pueden variar entre valores de 24 Kilobits por segundo a 64 Kilobits por segundo, por cada llamada. El tamaño de los paquetes depende de la codificación que utilicen (*Codecs*). Independientemente de esto, estos valores son muy pequeños comparados con los de datos, que pueden llegar a alcanzar valores de Megabits o Terabits, los cuales deben de ser fragmentados y

enviados por la red demandando anchos de banda grandes para que puedan ser transmitidos en tiempos aceptables.

En una red PLC, con un ancho de banda mucho menor que en las redes tradicionales, estas situaciones deben de ser estudiadas a fondo, y sobre todo analizar si los diferentes dispositivos conectados en el sistema eléctrico afectan los servicios en tiempo real en el momento de ser utilizados.

9.3 Diferentes tipos de equipos y cargas conectados a la red eléctrica

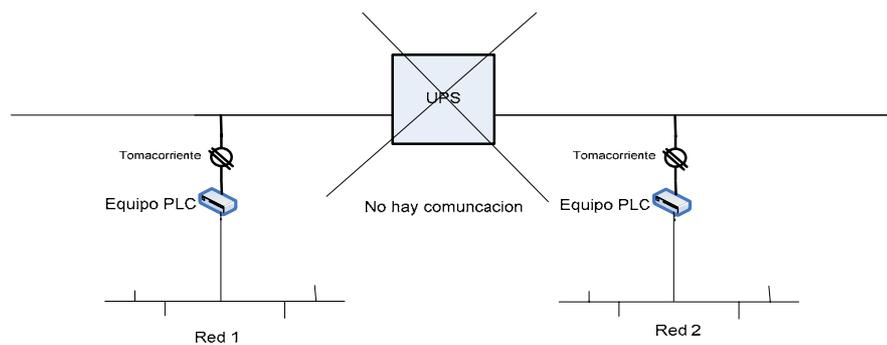
9.3.1 Sistemas de protección y UPS

Las señales de comunicaciones generadas por dispositivos PLC no pueden atravesar sistemas de protección con componentes reguladores y filtros (entre estos están protectores de voltajes picos, reguladores de voltajes, UPS). Esto se debe a que estos protectores no diferencian la señal de comunicaciones con una distorsión en el sistema eléctrico y la tratan como si fuera una señal parasita y la filtran. Inclusive, las regletas estándar que tienen protectores de picos, filtran la señal PLC.

Esto representa una seria limitación para cualquier sistema que quiera transmitir señales de comunicaciones por el sistema eléctrico, ya que deben de usarse los circuitos no protegidos y es aquí donde están conectados todos los equipos que generan la mayor cantidad de situaciones no deseadas en los sistemas eléctricos (cargas inductivas, transitorios, armónicos, circuitos en diferentes fases, e incluso fallas).

En el caso de los UPS, los servicios de comunicaciones están limitados a funcionar únicamente dentro del mismo circuito que sale del UPS. Entre circuitos diferentes, no se logra la comunicación debido a que el UPS sirve como un aislante natural entre señales no deseadas ya que filtra cualquier señal que el considera parasita, entre ellas las de comunicaciones.

Figura 26. Un UPS es un aislante natural para las señales de comunicaciones.



Fuente: Elaboración propia

9.3.2 Cargas inductivas

Las cargas inductivas son aquellas que producen campos magnéticos, y tienen la característica de generar corrientes con desfases (ángulos diferentes al del voltaje). El valor del desfase del ángulo depende de parámetros como la frecuencia, la resistencia en los conductores, la resistencia propia de la carga y la reactancia inductiva.

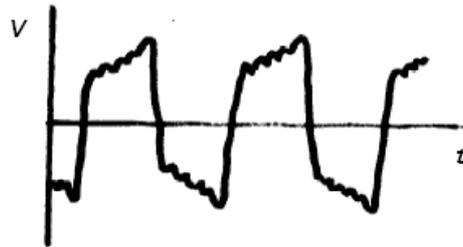
Adicionalmente, en el caso de los motores, generan fuerzas magnetomotrices las cuales inducen otros tipos de voltaje en los conductores que son alcanzados por los campos magnéticos. También hay que considerar que hay motores con cargas y velocidades variables, los cuales generan una mayor inestabilidad en el sistema. Todos los motores de corriente alterna producen estas características en el arranque, sin embargo en régimen permanente presentan diferentes conductas, dependiendo del tipo de motor.

Los motores universales de altas velocidades, adicionalmente a lo ya mencionado, también producen un arco eléctrico debido a los carbones que conectan los rotores del inducido, y un arco eléctrico genera distorsiones y ruido. Este tipo de motores es muy utilizado en diversos aparatos de hogares, oficinas e industrias, por lo cual pueden afectar las señales de comunicaciones al ser transmitidas por el mismo medio.

Los sistemas de iluminación fluorescentes utilizados en la mayoría de edificios comerciales, administrativos e industrias, utilizan un dispositivo para poder aumentar el voltaje al arranque y reducirlo durante el régimen permanente por medio de un transformador (denominados balastos). Este tiene una alta inductancia e introduce en el sistema cambios a las señales de voltaje y corriente. Aunque actualmente ya existen balastos electrónicos, aún existen muchas lámparas con este tipo de balastos.

En la figura 27 se observa el voltaje medido en un sistema de iluminación fluorescente, el cual se puede ver difiere del voltaje original suministrado al equipo, debido a las distorsiones de la onda presentadas en las crestas. Sin embargo, la distorsión de la onda no es del todo debido al balastro, sino también por el efecto fluorescente que sucede dentro de la lámpara.

Figura 27. Distorsión del voltaje en una lámpara fluorescente



Fuente: <http://books.google.com/>

9.3.3 Cargas no lineales

Las cargas no lineales generan armónicos y son producidos especialmente por rectificadores estáticos y conmutados, los cuales son utilizados en equipos electrónicos y transformadores saturados. Los equipos de PLC en si también generan armónicos ya que generan corrientes no lineales debido a sus circuitos electrónicos, aunque son de amperajes muy bajos, pero de frecuencias altas, y al sumarse todas ellas dentro de un sistema de potencia, los armónicos generados se deben de considerar. Los balastos electrónicos también generan armónicos.

Cualquier forma de onda que utilice el mismo medio, afectara a las señales de comunicaciones, debido a que generan distorsiones y al sumarse generan degradación en el tiempo de respuesta en las cuales se espera que los servicios de comunicaciones puedan responder. Adicionalmente, todas las señales con las cuales la señal PLC se mezcla, deberán ser filtradas por los

equipos terminales, y entre más señales se tengan, el trabajo de filtrado es más complicado, por lo que existe el riesgo que se pierda fidelidad en las señales.

Los equipos electrónicos adicionalmente a los armónicos generados, también presentan los efectos de los capacitores, los cuales entregan energía transitoria al sistema, y en determinado momento pueden servir como filtros pasa altos, dejando pasar las frecuencias mayores y pudiendo cambiar la trayectoria de la señal hacia su destino final, por lo que pueden ser un obstáculo para transmitir a altas frecuencias.

9.3.4 Circuitos en diferentes fases

En la mayoría de sistemas eléctricos, incluyendo servicios de distribución, instalaciones comerciales e industriales, se tienen servicios trifásicos los cuales constan de tres líneas de voltaje desfasadas 120 grados eléctricos entre si. Los servicios a los usuarios finales se dan tomando el voltaje entre una línea de estas y neutro. Los equipos de PLC para usuarios finales vienen diseñados para trabajar en su mayoría a 120 Volts monofásicos.

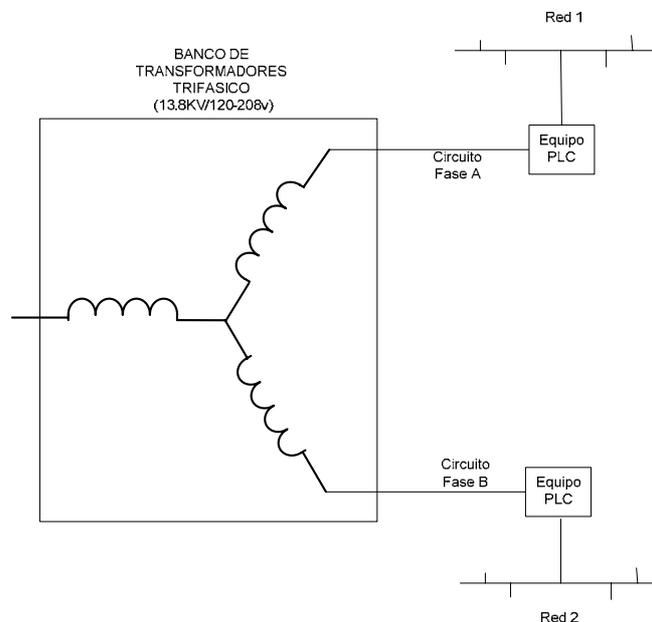
Si se desea transportar una red de datos interna o de telefonía por un sistema de distribución eléctrica, los usuarios deberán de comunicarse con otros que se encuentran en circuitos ubicados en diferentes fases, por lo que la señal deberá de atravesar los devanados secundarios de los transformadores que reciben el voltaje de la empresas que distribuyen el servicio eléctrico y lo transforman a valores comerciales.

Esto origina que la señal de comunicaciones llegue a su destino final después de transitar por los transformadores, donde circulan las corrientes de

todas las cargas y, adicionalmente a esto, que las señales atraviesen transformadores genera que tengan contacto con armónicos y otras distorsiones que se generan dentro de este, y se generan atenuaciones y ruidos no deseados en las señales de comunicaciones, perjudicando el rendimiento de las mismas, sobre todo si los transformadores se encuentran sobrecargados.

También se tienen los efectos causados si no se tiene un circuito balanceado (conexiones estrella, generalmente en servicios 208/120V), ya que se tienen en el neutro las resultantes de las sumas vectoriales de las mismas, y afecta por consiguiente las señales de comunicaciones que son de voltajes bajos y frecuencias altas, muy susceptibles a ser distorsionadas por cualquier otro tipo de onda.

Figura 28. Diagrama de dos equipos PLC conectados en dos fases distintas de un transformador



Fuente: Elaboración propia

9.3.5 Voltajes y corrientes transitorios

Los voltajes y corrientes transitorios son generados en las redes eléctricas al conectar o desconectar cargas en los sistemas de potencia. Los circuitos inductivos y capacitivos necesitan de un tiempo para poder llegar a su estado en que generalmente operan, por lo que al conectarse o desconectarse puede ser que tomen más energía o entreguen más energía al sistema eléctrico, y esto por consiguiente afecta todo el sistema.

Durante un período transitorio, las características del sistema eléctrico cambian, y esto por consiguiente afecta la señales de comunicaciones que puedan viajar por el y deben de ser tomados en cuenta la recurrencia de estos a la hora de hacer un diseño y analizar cuanto puedan afectar los servicios de comunicaciones que se trasladen por el.

Adicionalmente, las cargas no constantes generan también transitorios y estas son muy comunes en muchos lugares, ya que dependiendo de la carga o la demanda que se tenga, es la energía que consumen estos equipos. Impresoras, fotocopiadoras, equipos con motores eléctricos, son un ejemplo de este tipo de cargas, considerando que las señales de comunicaciones no pueden viajar a través de equipos de protección (supresores de picos), deben de convivir con este tipo de distorsiones.

9.3.6 Transporte de señales de comunicación en líneas de transmisión

Transmitir señales de comunicación en las líneas de transmisión, conlleva los mismos problemas que hay en las instalaciones interiores, sin embargo a una mayor amplitud, ya que los voltajes y las corrientes son mayores, y existe

los mismos fenómenos que se han analizado (armónicos, transitorios, desfases, corrientes parasitas, etc.), y otros adicionales.

Los efectos que tienen las líneas entre si (capacitancias, inductancias, campos eléctricos y magnéticos a mayor escala) provocan ruido y atenuaciones a las señales que tratan de enviarse por este medio, adicionalmente que los equipos de comunicaciones instalados en los postes se ven también afectados por el medio que los rodea (temperatura, humedad, contaminación, fallas, interferencias del medio ambiente, entre otros.). También es otro tipo de conductor, de aluminio con aleaciones, lo cual no es el ambiente idóneo para las comunicaciones.

Con respecto a los servicios PLC, y debido a las causas anteriormente mencionadas, en la actualidad el servicio de comunicaciones que mayor se difunde en las líneas de transmisión externa es el de Internet. Transmitir datos o telefonía, es muy riesgoso ya que las señales pueden sufrir degradaciones muy grandes, y los servicios al usuario final no serán los adecuados.

En algunos países ya se cuenta con el servicio de Internet por las líneas de transmisión, por lo que también analizaremos esta parte, y como éste se ve afectado por los distintos dispositivos activos y pasivos del sistema eléctrico.

Los servicios de Internet se introducen en el sistema de distribución eléctrica en el lado de medio voltaje (distribución de 13.8 KV), el cual parte de las subestaciones que reciben las líneas de alto voltaje (69KV a 230KV), y por medio de transformadores de gran capacidad baja los valores de voltaje a 13.8 KV para que pueda ser distribuido hacia las áreas residenciales.

En estas subestaciones se instalan los equipos PLC que se conectan a las líneas de transmisión (denominado *Head Ends*), los cuales tienen la función de conectar la señal de Internet a las líneas de Medio Voltaje, y deben de instalarse a determinadas distancias para que puedan transportar la señal de comunicaciones y amplificar la señal.

Cuando llegan a las áreas residenciales, se colocan junto a los transformadores de distribución (13.8KV/208-120V) que están en los postes o en las bóvedas de los edificios, *Head Ends* con entrada de 13.8KV y salida 120V, para poder prestar servicio a los usuarios finales. En el diagrama de la figura 29, se muestra la forma de trasladar el servicio de comunicaciones por el sistema de distribución eléctrica.

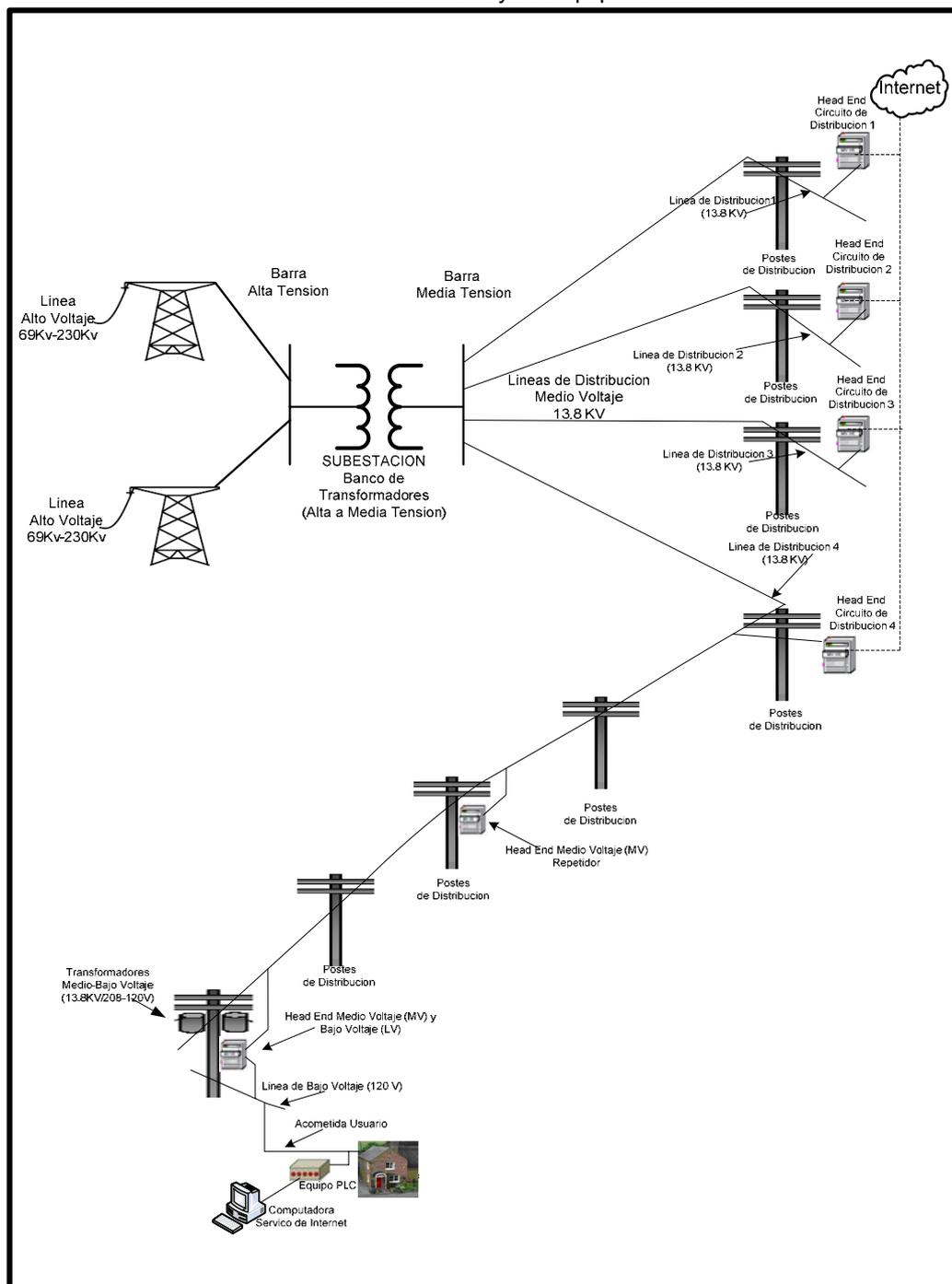
9.4 Capacidad de transmisión

La capacidad de transmisión a la que se puede llegar en un sistema eléctrico con equipos PLC depende del tipo de equipo que se conecte y la frecuencia a la que trabaje. Actualmente existen equipos que transmiten a 200 Megabits por segundo (cantidad de bits enviados por segundo), sin embargo esta tecnología es aún nueva y en instalaciones interiores los más usados son los de 85 Megabits por segundo.

Realmente, lo que se tiene no es una velocidad, sino una tasa de transferencia de pulsos (bits) que es la cantidad máxima de paquetes que se pueden transmitir en una cantidad de tiempo, determinados por la frecuencia. En este caso, si se dice que se tiene una tasa de transferencia de 85 Megabits por segundo, significa que se pueden transmitir desde 0 hasta 85 Megabits en este periodo de tiempo (también se le denomina ancho de banda digital en bits, los cuales son proporcionales al ancho de banda de las frecuencias en hertz).

Sin embargo, este valor es nominal, esto significa que es lo máximo que pueden dar los equipos, asumiendo que no hay pérdidas ni situaciones en la red. En la práctica, no sucede esto, por los problemas que se analizarán más adelante.

Figura 29. Diagrama general de cómo se puede transmitir un servicio de Internet a través de un sistema de distribución eléctrica y los equipos utilizados.



Fuente: Elaboración propia

10. EQUIPOS QUE PRODUCEN RUIDOS ELÉCTRICOS

Cualquier otro tipo de onda que pase por el conductor eléctrico, visto desde el punto de vista de las señales es ruido. Aunque no hubiera ninguna carga conectada al sistema, el voltaje que hay en las líneas (120 Volts, 60 Hz) es ruido para las señales de comunicaciones (ruido de intermodulación).

Como indica el teorema de Shannon, la forma de calcular el ruido es mediante la ecuación 6.2.1. En el sistema aparte del voltaje están las cargas de equipos electrónicos que generan armónicos, los motores de inducción con escobillas que producen arcos eléctricos, los interruptores de circuitos que ocasionan transitorios, las lámparas fluorescentes que generan ruido eléctrico, las cargas resistivas que consumen gran cantidad de energía y producen ruido térmico, y muchas situaciones mas que terminan causando el mismo efecto: degradación en la transmisión de datos

Recordando el teorema de Shannon, en la ecuación 6.2.1 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$C_h = B \log_2 (1 + 10^{(SNR/10)}) \quad (10.1)$$

Las frecuencias son proporcionadas por el equipo y para que se puedan transmitir dependen de la inductancia y capacitancia del sistema. La relación señal ruido se puede calcular al dividir la amplitud de la onda de comunicaciones, que aunque no esta normado, la mayoría de veces tiene una

amplitud de 2 Volts, dentro de la amplitud del ruido que es cualquier onda que se mezcle con la señal de comunicaciones. A continuación analizaremos los ruidos producidos por diferentes tipos de equipos.

10.1 Diferentes equipos que producen ruido

10.1.1 Ruido producido por equipos electrónicos

Los dispositivos perturbadores que podemos tener más cerca son los aparatos electrónicos (computadoras, equipos de TV, equipos de sonido, etc.). Las computadoras, por ejemplo llevan incorporados diversos osciladores para regular el funcionamiento de sus circuitos; la mayoría de ellos son osciladores a cuarzo y, por ello de frecuencia notablemente estable. Sin embargo, la frecuencia de esos osciladores no se usa a su valor inicial, sino como base para generar otras mediante sintetizadores o divisores/multiplicadores.

Los equipos de televisión utilizan intensidades elevadas que se manejan en la etapa de barrido horizontal de los televisores y pantallas de computadoras (especialmente los de pantalla plana), unidas a su forma de onda en diente de sierra y a la longitud de las conexiones internas, hace que esos circuitos sean unos potenciales emisores de señales de alta frecuencia.

Por razones de eficiencia eléctrica, peso y costo, todas las computadoras y los televisores construidos en los últimos diez años alimentan los distintos circuitos haciendo uso de fuentes conmutadas. Estas fuentes se basan en la interrupción de una tensión continua obtenida a expensas de rectificación de la red y funcionan a frecuencias entre 30 y 70 KHz y utilizan señales rectangulares y triangulares, con un elevado contenido armónico. Los armónicos de esa señal

de conmutación pueden propagarse a la red y alcanzar niveles importantes, generando ruido correlacionado.

Además del barrido horizontal del haz, para el que la mayoría de pantallas (monitores) de computadoras, usan frecuencias de barrido distintas y más altas que los televisores y que, al igual que en aquellos, produce señales interferentes, la señal de vídeo que se aplica al tubo de imagen contiene componentes de alta frecuencia ricos en armónicos y alcanza valores de hasta 100 V. Esta señal de vídeo puede inducirse a las conexiones de la pantalla con la computadora o al cable de red y éstos actúan como antena.

10.1.2 Ruido producido por sistemas de iluminación

Las modernas lámparas de descarga gaseosa (bajo consumo) están basadas en la excitación de una capa de material fluorescente por la radiación ultravioleta generada en una descarga entre dos electrodos en una atmósfera de gas a baja presión. Al envejecer la lámpara, esta descarga gaseosa se hace inestable y esa inestabilidad puede llevar al dispositivo a entrar durante un instante del ciclo, en un estado de “resistencia negativa”.

En este estado la energía recibida se transforma en frecuencias altas, en lugar de la radiación ultravioleta esperada. La naturaleza del gas en el que se efectúa la descarga hace que la onda generada no tenga una frecuencia definida, sino que se extiende a lo ancho del espectro radioeléctrico, generando armónicos y por consiguiente ruido al sistema (ruido correlacionado y de intermodulación).

Las lámparas fluorescentes tradicionales poseen el balastro que eleva el voltaje al encender y lo disminuye al estar en régimen, por lo que genera transitorios e inestabilidades en el voltaje, como el indicado en la figura 27. Actualmente ya existen balastros electrónicos los cuales regulan las lámparas en altas frecuencias (20 KHz), lo que produce armónicos. Adicionalmente se producen los efectos químicos antes mencionados por la excitación del flúor y la generación de frecuencias por la descarga de voltajes en el gas a baja presión produciendo también armónicos.

Otras lámparas de descarga gaseosa, como las de vapor de mercurio (azuladas) y de vapor de sodio (amarillas) utilizadas en el alumbrado público, también sufren de ese fenómeno de generación de frecuencias cuando envejecen. Los postes metálicos del alumbrado público, en especial, que están puestos a tierra en su base, actúan como eficaces antenas para transmitir esas frecuencias y causar ruido a los conductores que estén a su alrededor.

10.1.3 Ruido producido por motores de corriente alterna

Los motores de inducción al estar en régimen permanente, generan fuerzas electromotrices que producen inducciones, sin embargo los niveles de ruido que introduce al sistema no son tan elevados ya que generan muy pocos armónicos, y los motores trifásicos no generan armónicos múltiplos de tres, y se consideran cargas eminentemente inductivas conectadas en paralelo, las cuales no afectan las señales de altas frecuencias que puedan llegar a ellos.

Los motores universales, a diferencia de los de inducción, debido a el arco eléctrico que producen las escobillas, genera demasiado ruido y armónicos que las introduce al sistema debido a la distorsión de las ondas, y este tipo de motor

si afecta considerablemente las señales de comunicaciones que estén en el medio.

10.1.4 Ruido producido por elementos de control de dispositivos de corriente alterna

Numerosos dispositivos alimentados con corriente alterna (motores, calefactores, lámparas de incandescencia y otros) regulan su potencia mediante circuitos de control que recortan la onda sinusoidal de la red (*dimmer*) de forma que la energía se aplica sólo durante una parte del ciclo. Ese corte brusco de la energía produce armónicos hasta frecuencias muy elevadas.

Además, es frecuente que los propios semiconductores que efectúan la conmutación generen oscilaciones parásitas durante algunos instantes del ciclo. Estas oscilaciones parásitas y los armónicos de la frecuencia de conmutación, si no son filtrados muy eficazmente, circulan por los cables de la instalación eléctrica, que actúan como antena.

10.1.5 Ruido en los transformadores de potencia

Un transformador de potencia es uno de los equipos más ruidosos que existen, debido a que aparte de producir su propio ruido debido a los campos magnéticos internos y las inducciones que existen internamente con sus efectos, soporta los ruidos que vienen de una red eléctrica debido a las cargas, como lo son armónicos, corrientes transitorias, fallas en el sistema, etc. Todos los tipos de ruido se pueden encontrar en este equipo, inclusive hasta ruido

térmico por calentamiento y ruido mecánico por las fuerzas magnéticas las cuales producen vibraciones.

Otra fuente de perturbaciones tiene su origen por fugas en aisladores o dispositivos de protección en transformadores ubicados en postes en el sistema de distribución eléctrica, y debido a la capacitancia que existe en las boquillas de conexión. La señal que producen estos dispositivos cuando son defectuosos es un zumbido a 60 Hz de banda ancha y de amplitud variable con las condiciones atmosféricas, especialmente la humedad relativa.

11. ANÁLISIS ELÉCTRICO

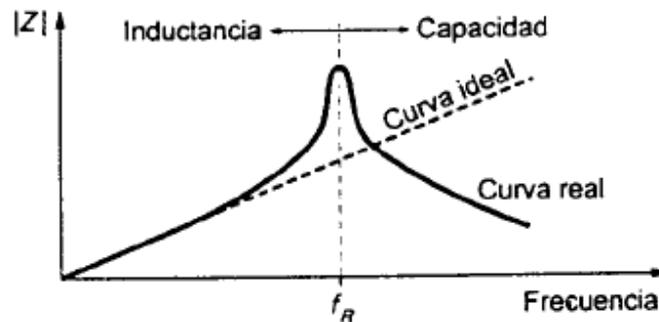
11.1 Análisis de los efectos de la inductancia y capacitancia del sistema

En un circuito, la resistencia aumenta con la frecuencia de las señales eléctricas aplicadas, como lo indica la ecuación 2.6.1.3. Esto significa que ha mayor frecuencia, mayor debería de ser la oposición de este a la conducción de señales. Pero, en la practica eso no sucede así, debido a las inductancias y capacitancias. Las inductancias se oponen al paso de altas frecuencias, mientras las capacitancias favorecen al paso de ellas.

Lo anterior indica que ha bajas frecuencias, mientras la capacitancia sea de valores pequeños, entre más alta sea la frecuencia, más es la oposición del circuito a que circulen por el las señales, ya que a frecuencias bajas, el valor predominante son las inductancias. Sin embargo, se llaga a un punto que esto cambia, y entre más alta son las frecuencias, la oposición del circuito a que circulen señales es menor. Esto es debido a que la capacitancia prevalece en el circuito y permite la circulación libre de altas frecuencias.

La impedancia del circuito es la oposición total al paso de señales debido a las resistencias, inductancias y capacitancias. Básicamente, como se vera más adelante, las características que afectan en un circuito eléctrico a las señales de comunicaciones son las que tienen capacitancias en paralelo e inductancias en serie, y estos circuitos tiene la conducta que se muestra en la figura 30, en base a la frecuencia de transmisión de las señales que sean transmitidas por él.

Figura 30: Conducta de un circuito según la frecuencia aplicada

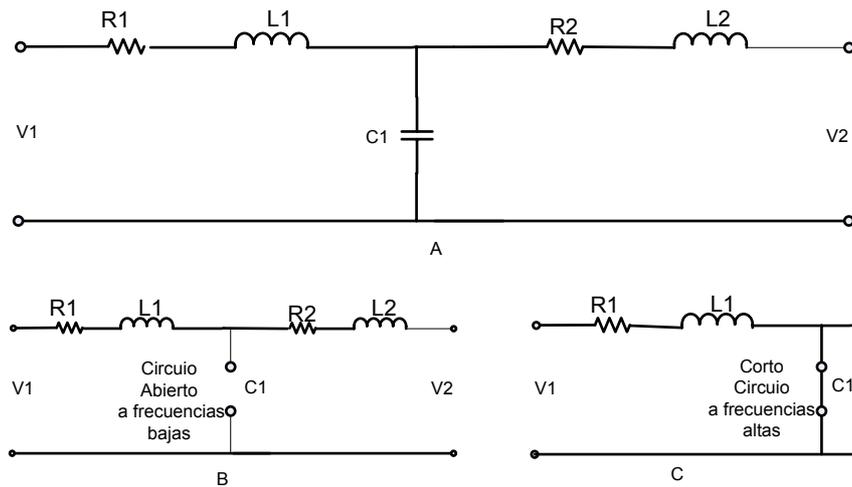


Fuente: www.profesores.frc.utn.edu.ar

La f_R es denominada la frecuencia de resonancia, y en todas las frecuencias que están a su izquierda en la gráfica, prevalece en la inductancia, y en todas las frecuencias que están a la derecha, prevalece la capacitancia. La frecuencia de resonancia es cuando la reactancia capacitiva es igual a la reactancia inductiva en un circuito, o en otras palabras, cuando la suma de reactancias es igual a cero. La línea recta (curva ideal) es la conducta que debería de tomar si solo existiera la resistencia, lo cual no sucede.

El circuito mostrado en la figura 31, tiene la conducta mostrada en la figura 30. A bajas frecuencias, la capacitancia tiene una impedancia muy alta, siendo prácticamente un circuito abierto, y se estaría ubicado en la parte izquierda de la curva de la figura 30. Al pasar la frecuencia de resonancia y llegar a la parte de altas frecuencias, la capacitancia toma un papel muy importante, ya que muestra poca oposición al paso de señales, y si la frecuencia es demasiado alta, se puede llegar a considerar como un corto circuito, como se observa en la figura 31.

Figura 31: Un circuito como se observa en A, a bajas frecuencias su circuito equivalente es como el que se muestra en B y a altas frecuencias es como el que se muestra en C.



Fuente: Elaboración propia

Lo anterior es importante de determinar, ya que a frecuencias menores de la frecuencia de resonancia, los efectos capacitivos pueden despreciarse, pero a frecuencias mayores se deben de tomar en cuenta. Las señales PLC transmiten a frecuencias altas (un máximo de 30 MHz), por lo que los efectos capacitivos del sistema afectan considerablemente el ambiente.

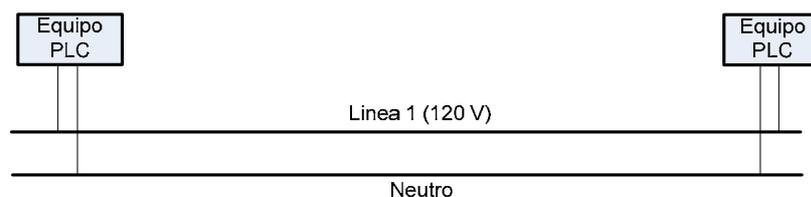
A frecuencias muy altas, un capacitor proporciona valores de impedancia muy bajos, inclusive de fracciones de Ohms, por lo que dependiendo del valor de la capacitancia, muchas veces puede ser considerado como un corto circuito, dando una trayectoria diferente o un medio de dispersión a la señal, ocasionando que no llegue a su destino una señal con frecuencia muy alta al encontrarse una capacitancia en paralelo, como lo muestra la figura 31 C.

11.1.1 Análisis en circuitos sin cargas

Partiendo como base el circuito básico de la figura 9.1, y que se tienen dos equipos PLC en un circuito sin carga, únicamente con el conductor de por medio, existe entre ambos una la resistencia y la inductancia del conductor en serie, y la capacitancia y la conductancia de esta en paralelo. Para funciones de cálculo, no tomaremos en cuenta la conductancia de la capacitancia, pero si tomaremos en cuenta la resistencia de la línea, ya que las señales que se transmiten son muy pequeñas y cualquier obstáculo que encuentre en el camino puede afectarle.

El diagrama físico de conexión entre los dos equipos PLC sería el que se muestra en la figura 32.

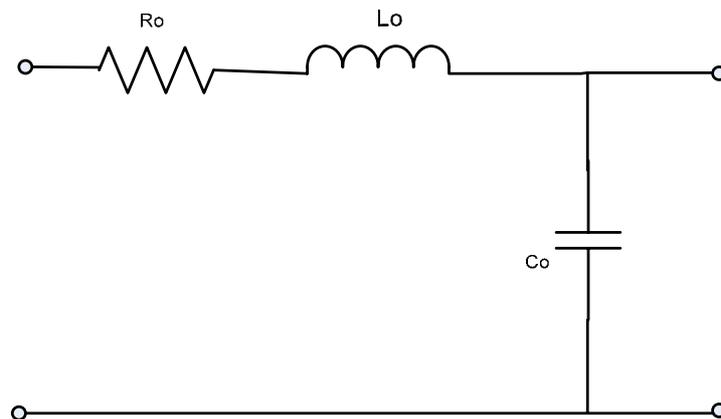
Figura 32. Diagrama de conexión entre dos equipos PLC con un circuito dedicado



Fuente: Elaboración propia

El diagrama eléctrico de los conductores simplificado se puede observar en la figura 33.

Figura 33. Diagrama equivalente del conductor eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

Donde:

- R_o es la resistencia del conductor
- L_o es la inductancia del conductor
- C_o es la capacitancia del conductor

Las reactancias de las líneas se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_{L_o} = j(2\pi f L_o) \quad (11.1.1.1)$$

$$X_{C_o} = -j / (2\pi f C_o) \quad (11.1.1.2)$$

La impedancia total de una línea de transmisión, esta dada por la siguiente ecuación, si asumimos que R y G tienen valores muy pequeños:

$$Z = \frac{\sqrt{R + jX_{Lo}}}{\sqrt{G + jX_{Co}}} = \frac{\sqrt{wL_o}}{\sqrt{wC_o}} = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} \quad (11.1.1.3)$$

La inductancia de los dos conductores se calcula mediante la ecuación 2.6.1.4, la cual si consideramos que μ es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ en el vacío, esta ecuación puede reescribirse de las siguientes maneras:

$$L_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ LN } (D/r) \quad [\text{H/m}] \quad (11.1.1.4)$$

$$L_o = 1.482 \text{ LOG } (D/r) \quad [\text{mH/milla}] \quad (11.1.1.5)$$

$$L_o = 9.211 \times 10^{-4} \text{ LOG } (D/r) \quad [\text{mH/m}] \quad (11.1.1.6)$$

Donde:

-L es la inductancia de los conductores por unidad de longitud (medida en Henrios por metro, Milihenrios por metro o Milihenrios por milla).

-D es la distancia entre los dos conductores

-r es el Radio del conductor

La capacitancia de los conductores esta en paralelo con los equipos PLC, y se calcula mediante la ecuación 2.6.4.1, la cual si consideramos que ϵ_o es igual a 8.854×10^{-12} F/m para el vacío, esta ecuación puede reescribirse de cualquiera de las siguientes maneras:

$$C = \frac{0.0388}{\text{Log } (D/r)} \quad [\mu\text{F/milla}] \quad (11.1.1.7)$$

$$C = \frac{2.411 \times 10^{-5}}{\text{Log } (D/r)} \quad [\mu\text{F/m}] \quad (11.1.1.8)$$

Donde:

-C es la capacitancia entre los dos conductores, medida en Microfaradios por metro o por milla

-D es la distancia entre los dos conductores

-r es el radio del conductor

Los cálculos anteriores es considerando que el diámetro de los dos conductores es el mismo. Los valores de las reactancias capacitivas e inductivas dependen del valor de las frecuencias que circulen por ellos. En la reactancia inductiva, el valor aumenta con la frecuencia, y en la capacitiva disminuye.

Si solo se tiene entre los dos equipos PLC los conductores sin ningún tipo de carga, entre ellos se tendrá únicamente la impedancia de las líneas. Para calcular la frecuencia de resonancia, la reactancia inductiva debe de ser igual a la reactancia capacitiva (la parte imaginaria de la impedancia debe de ser igual a cero), por lo que quedaría expresada de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}X_{Lo} &= X_{Co} \\j(2\pi frLo) &= \frac{-j}{2\pi frCo} \\fr &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LoCo}}\end{aligned}\tag{11.1.1.9}$$

Donde:

-Lo es la inductancia de la línea

-Co es la capacitancia de la línea

-fr es la frecuencia de resonancia

- X_L es la reactancia inductiva del conductor
- X_C es la reactancia capacitiva del conductor

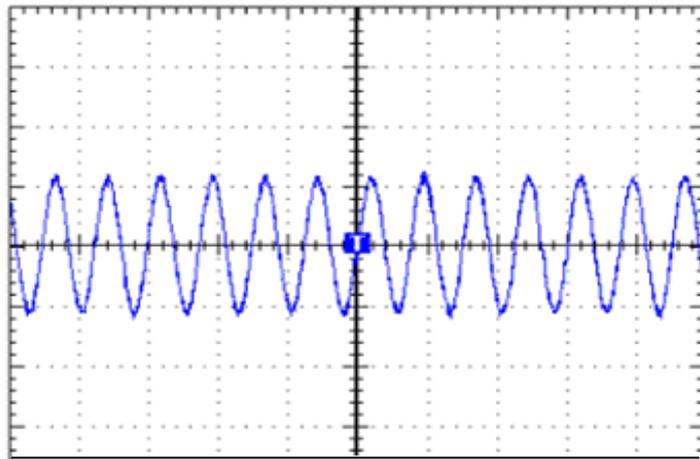
Al hacer la operación matemática para diferentes tipos de conductores utilizados en instalaciones eléctricas interiores, y considerando que la distancia entre estos es poca, debido a la forma en que se ubican en la ductería, la frecuencia de resonancia se encuentra en el orden de los Kiloherz y las señales de PLC viajan a frecuencias en el orden de los Megahertz. Esto muestra que los efectos capacitivos de las líneas afectan las señales de comunicaciones que van en el conductor.

En las figura 34, se puede ver la señal de una portadora que sale de un equipo PLC, y la que llega al equipo del otro extremo, teniendo una atenuación en su amplitud debido a su trayectoria por el conductor eléctrico.

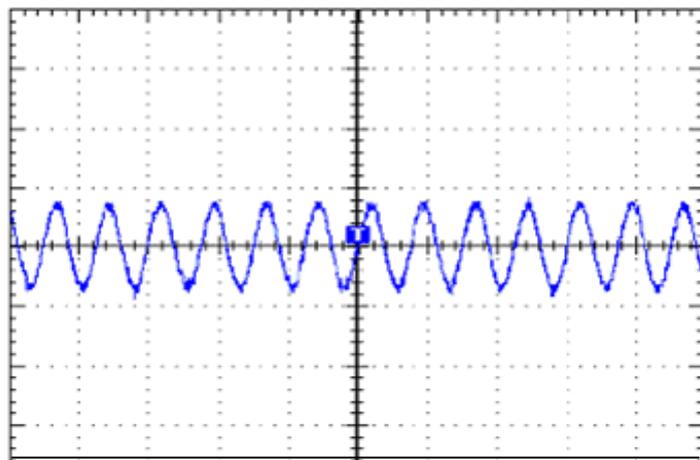
La inductancia en la línea siempre esta en serie a las señales, igual que la resistencia, generando una oposición al paso de las señales, aparte del campo magnético producido el cual interfiere en la señal. Su principal característica es la atenuación de la señal, y limita la longitud del conductor para determinar hasta donde se puede transmitir la señal.

La capacitancia entre las líneas genera entre ellas un campo eléctrico, y el efecto que tiene es que existen distorsiones en las señales debido a la interferencia de un conductor sobre otro, tales como atenuación y diafonía. Adicionalmente, es como que se tuviera un capacitor en paralelo a la carga, el cual, aunque es de bajo valor de capacitancia, al tener altas frecuencias puede funcionar como un filtro pasa altos y pueden tener efectos en la propagación de la señal. La reactancia capacitiva (en paralelo) es la principal característica para determinar los valores de frecuencia a transmitir por el circuito.

Figura 34. Señal PLC al momento de partir del equipo transmisor (A) y al momento de llegar al equipo receptor (B), atenuada por el medio.



A



B

Fuente: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

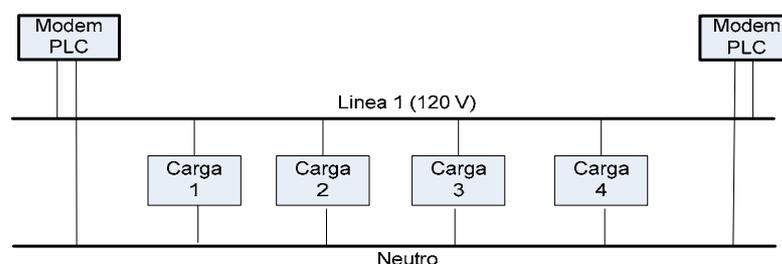
Para evitar las capacitancias y los campos eléctricos en los conductores que se utilizan para transmitir señales de comunicaciones, se trenzan entre sí cables con polaridades diferentes, así se anulan estos efectos al eliminar la separación entre los conductores y restar las cargas entre sí, lo cual no se puede hacer con los conductores eléctricos convencionales.

11.1.2 Análisis en circuito con cargas

Los cálculos anteriores son para analizar que sucede con las señales si se usa un circuito dedicado solo para el transporte de las mismas. En la práctica esto nunca sucederá así, ya que el objetivo es pasar las señales por una red eléctrica ya existente, en el cual hay conectados todo tipo de cargas los cuales tienen que convivir con las señales que serán transportadas por el mismo medio.

Un circuito real es como el que se muestra en la figura 35, donde están los equipos PLC, conectados en un circuito donde hay también conectadas otras cargas.

Figura 35. Ambiente real de conexión de dos equipos PLC

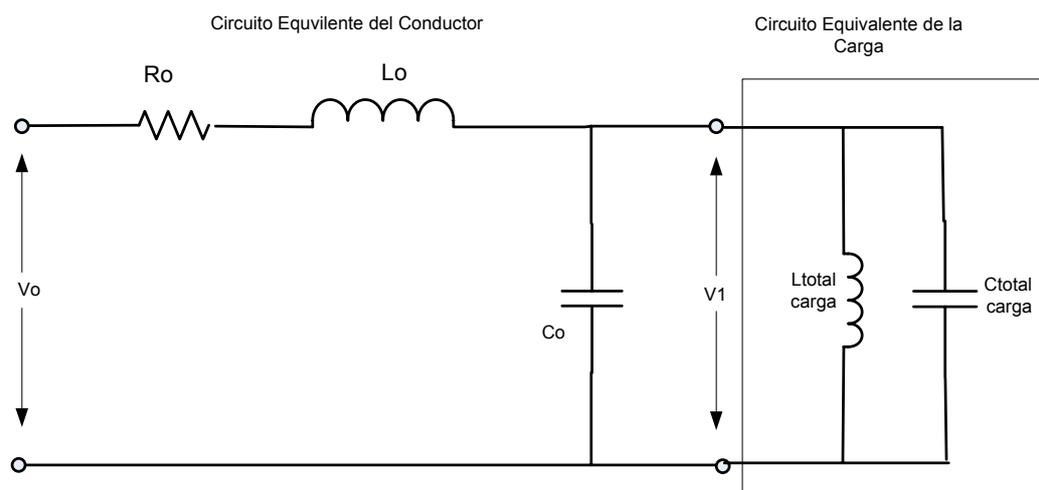


Dibujo: Elaboración propia.

Las cargas pueden ser de cualquier tipo: lámparas, equipos electrónicos, motores, etc. los cuales tienen entre sí cargas inductivas y capacitivas, así como componentes que generan ruido debido a transitorios, arcos eléctricos y armónicos. Lo que trataremos de analizar en esta sección es cómo afectan las inductancias y capacitancias de las cargas a las señales que se transmiten por los mismos circuitos.

Al tener varias cargas en paralelo, podríamos sumar todas las inductancias de las cargas y todas las capacitancias, así como todas las resistencias. Desde el punto de vista de frecuencias, las cargas resistivas no afectan la transmisión de estas. La reactancia de la carga total se podría representar como la inductancia total de la carga conectada en paralelo con la capacitancia total de la carga, por lo que el diagrama equivalente sería el que se muestra en la figura 36.

Figura 36. Diagrama equivalente de un circuito con carga.

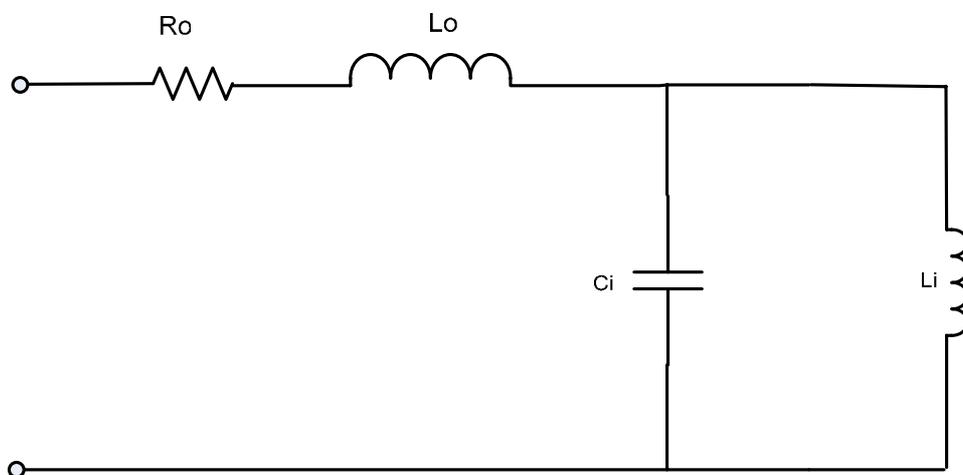


Fuente: Elaboración propia

La inductancia total en paralelo es el inverso de la suma de los recíprocos de cada inductancia. La capacitancia total es la suma de todas las capacitancias que tengan los sistemas. Estos valores pueden ser medidos con equipos especiales de forma directa del sistema o equipo que se quiera conectar.

El circuito se puede simplificar más, ya que la capacitancia del conductor está en paralelo con la de las cargas, por lo que se pueden sumar y el circuito quedaría como el mostrado en la figura 37.

Figura 37. Diagrama simplificado de un circuito con carga



Fuente: Elaboración propia

Donde:

- R_o es la resistencia del conductor
- L_o es la inductancia del conductor

-Ci es la capacitancia del sistema (cargas y conductores)

-Li es la inductancia total de la carga

Al analizar la impedancia total del circuito, encontramos que tenemos Li y Ci en paralelo y estas a su vez en serie con el conductor (Ro y Lo). Al analizar el circuito, encontramos que la reactancia total del circuito es la siguiente:

$$X_{\text{total}} = X_{Lo} + \frac{(X_{Ci})(X_{Li})}{X_{Ci} + X_{Li}}$$

$$X_{\text{total}} = \frac{(X_{Lo} \cdot X_{Ci}) + (X_{Lo} \cdot X_{Li}) + (X_{Ci})(X_{Li})}{X_{Ci} + X_{Li}} \quad (11.1.2.1)$$

Donde:

$$X_{Lo} = j(2\pi f L_o)$$

$$X_{Li} = j(2\pi L_i)$$

$$X_{Ci} = -j / 2\pi f C_i \quad \text{y}$$

Ci es la suma de todas las capacitancias incluyendo las de los conductores

Analizando la ecuación a altas frecuencias, se puede observar que el valor de las reactancias inductiva es muy alto, por lo que el de la línea que esta en serie atenúa la señal y las de las cargas en paralelo presentan valores muy altos por lo que es imposible que las señales puedan circular por ahí (esto es desde el punto de vista de la inductancia, sin embargo generan ruidos que afectan la señal que va por los conductores).

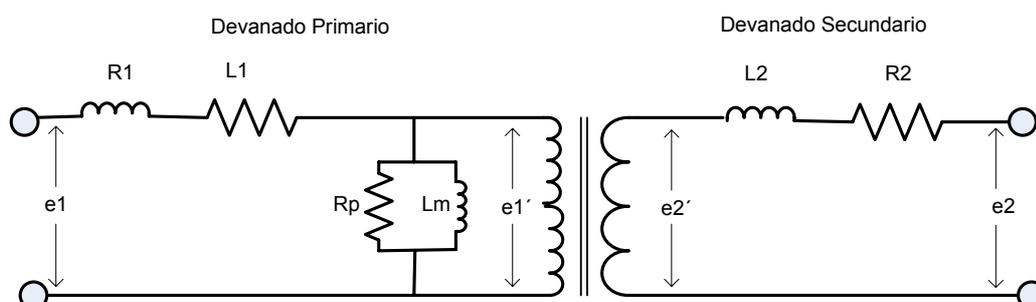
En contraposición, las capacitancias a altas frecuencias conectadas en paralelo funcionan como filtros pasa altos, ya que presentan reactancias capacitivas de valores muy bajos, por lo cual las señales pueden presentar una dispersión y pasar por estos dispositivos antes de llegar a los equipos PLC y causar una pérdida en las señales. Lo anterior es válido, siempre y cuando la capacitancia de la carga sea mayor que la de los conductores eléctricos.

Los valores inductivos y capacitivos de las cargas no son constantes, y dependen del momento en que se realice el análisis. En este caso son en régimen permanente, en un momento determinado. Sin embargo, el patrón de conducta es el mismo que se ha analizado y conocer los efectos de los diferentes equipos sobre la transmisión de las señales es el objetivo de este trabajo, para poder dimensionar diseños y proyectos y no solamente conectar equipo y ver que sucede, como se hace en la mayoría de casos en nuestro medio.

11.2 Análisis de los efectos causados por los transformadores de potencia

Como se observó anteriormente, al estar los equipos PLC en circuitos conectados en diferentes fases, el devanado secundario del transformador de potencia es una ruta obligada para las señales de comunicaciones, y por consiguiente la señal que entra al transformador sale afectada por este. Puede darse el caso que se tenga una instalación monofásica 120/240 v, o una instalación trifásica, que puede ser 120/208 v (conexión estrella de los transformadores) o una instalación industrial 120/240 v (conexión delta de los transformadores). El circuito equivalente de un transformador es el mostrado en la figura 38.

Figura 38. Circuito equivalente de un Transformador de Potencia



Fuente: Elaboración propia

Donde:

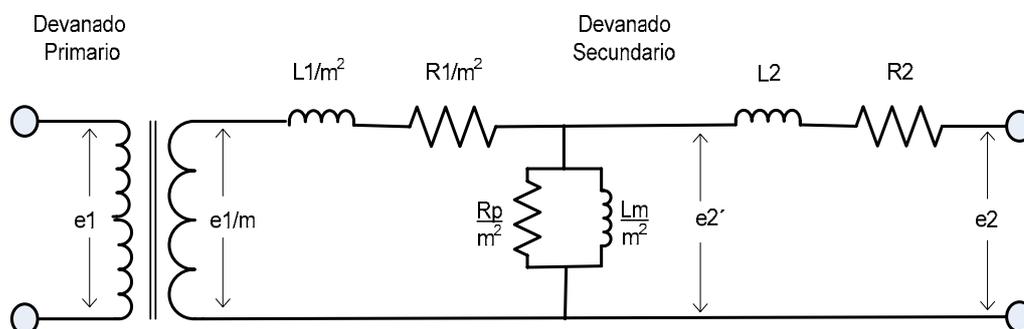
- R_1 es la resistencia del devanado primario
- L_1 es la inductancia del devanado primario
- R_p es la resistencia de pérdidas del núcleo
- L_m es la inductancia de pérdidas del núcleo por corriente magnetizante
- R_2 es la resistencia del devanado secundario
- L_2 es la inductancia del devanado secundario
- e_1 es el voltaje de de entrada del primario
- e_1' es el voltaje real del devanado primario, después de las pérdidas
- e_2' es el voltaje del devanado secundario
- e_2 es el voltaje de salida después de las pérdidas

En los transformadores de potencia, el valor de entrada del primario es de valores de voltaje alto, el cual proviene de las líneas de distribución del sistema

eléctrico de voltaje mediano. En nuestro medio el valor utilizado es de 13,800 Volts (13.8 KV), mientras que en el secundario se tienen los valores comerciales (120, 208 o 240 Volts). Por consiguiente, la inductancia y resistencia del devanado primario es de valores altos, y los efectos magnéticos que ejerce sobre el secundario afectan las señales que circulen por el, por lo que hay que considerar sus efectos.

Los parámetros del primario pueden ser trasladados al secundario, mediante el circuito equivalente, mostrado en la figura 39.

Figura 39. Circuito equivalente del transformador, con el primario referido al secundario



Fuente: Elaboración propia

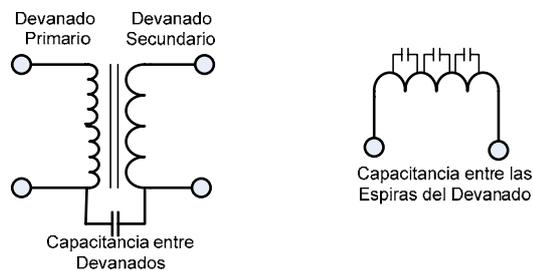
Donde:

- m es la relación de transformación

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta el efecto de las capacitancias que hay entre los devanados primarios y secundarios, y la que existe entre los conductores del mismo devanado, debido a las cargas de los conductores y los

aislantes que existen entre ellos que funcionan como dieléctricos. En la figura 40 se indica los lugares donde se localizan las capacitancias en un transformador.

Figura 40. Capacitancias entre devanados y espiras de un transformador



Fuente: Elaboración propia

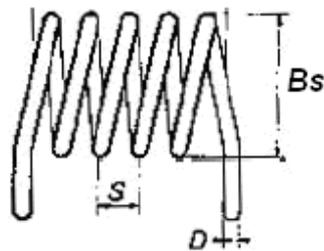
La ecuación para calcular la capacitancia entre las espiras de un devanado (C_{dev}) es la siguiente:

$$C_{dev} = \frac{B \epsilon_r (n-1)}{11.45 \cosh^{-1}(S/D)} \quad (11.2.1)$$

Donde:

- Bs es el diámetro de la espira del devanado
- ϵ_r es la permeabilidad del aislante que esta en el centro de la espira
- n es la cantidad de espiras
- S es la distancia entre hilos de la espira
- D es el diámetro del conductor

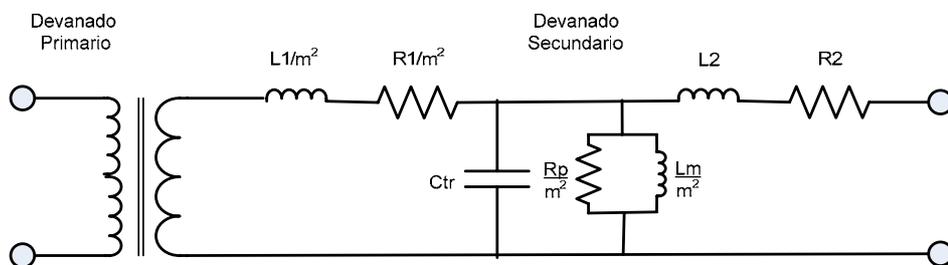
Figura 41. Parámetros de la espira de devanado de un transformador



Fuente: Adaptado, www.profesores.frc.utn.edu.ar/

Como se puede observar, la capacitancia de los devanados es complicada de calcular, a menos que se sepan los parámetros de las espiras, y de igual forma la capacitancia entre los devanados primario y secundario depende de varias circunstancias y de la forma física de la ubicación de las bobinas. La mejor forma de calcularla es midiéndola directamente por medio de un analizador de potencia. Los valores de las resistencias e inductancia son dados por el fabricante. El circuito final del transformador quedaría como el que se muestra en la figura 42.

Figura 42. Circuito equivalente de un transformador, incluyendo sus capacitancias Internas.



Fuente: Elaboración propia

Donde:

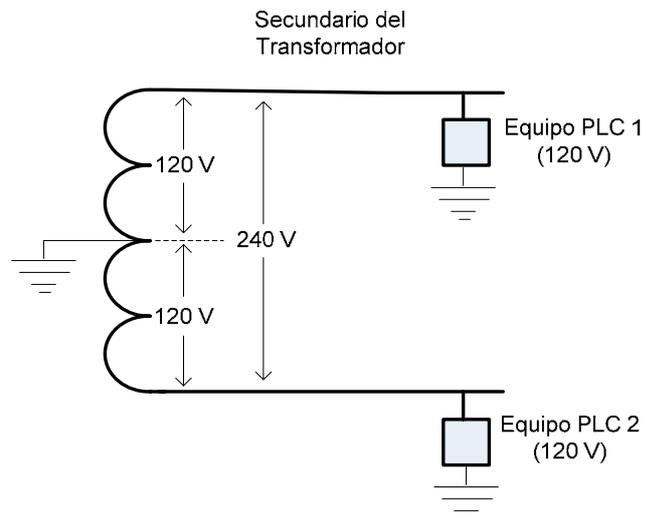
-C_{tr} es la capacitancia total del transformador.

-m es la relación de transformación

11.3 Análisis en circuitos monofásicos

Si se tienen dos equipos PLC entre dos circuitos ubicados en diferentes líneas en una instalación monofásica de 120/240v, el diagrama para este ambiente sería el mostrado en la figura 43.

Figura 43. Conexión de dos equipos PLC entre dos líneas de transformador, en un circuito monofásico 120/240V, conectado a la salida del mismo

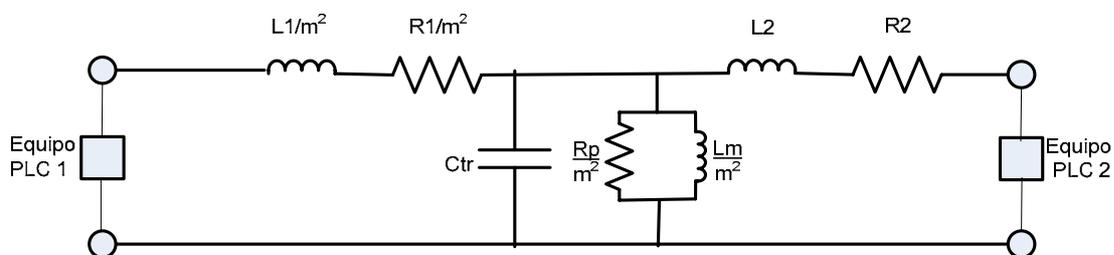


Fuente: Elaboración propia

Para que la señal llegue de un equipo PLC a otro, debe de viajar por el transformador. Si se colocan los equipos exactamente en la salida de los transformadores, estando este sin carga y sin tener conductores largos para alimentar los equipos, el circuito entre los dos equipos sería el mostrado en la figura 44.

Para simplificar el circuito, los únicos parámetros que se pueden despreciar son la resistencia de pérdidas del núcleo ya que su valor es muy alto y esta en paralelo, la resistencia del secundario, ya que su valor generalmente es bajo y está en serie, así como la inductancia de magnetización del núcleo del transformador, ya que las señales funcionan a frecuencias altas, por lo que su reactancia es de valor considerable y no afecta al estar en paralelo.

Figura 44. Circuito equivalente para el diagrama de la figura 43



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros son los mismos que en el circuito de la figura 42.

La resistencia del secundario generalmente es de valores muy pequeños, comparada con la del primario, por lo que para términos de cálculo puede

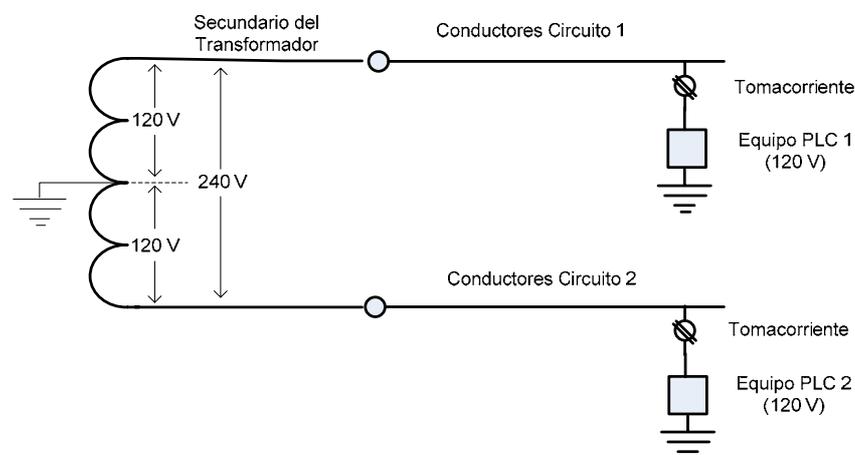
también no utilizarse. Los demás valores deben de tomarse en cuenta. La impedancia entre los dos equipos (que es la del transformador) sería:

$$X_{tr} = \frac{(X_{L2})(X_{L_m})(X_{Ctr})}{(X_{L2})(X_{L_m})+(X_{L2})(X_{Ctr})+(X_{L_m})(X_{Ctr})} + X_{L1}/m^2 \quad (11.3.1)$$

$$Z_{tr} = R1/m^2 + jX_{tr} \quad (11.3.2)$$

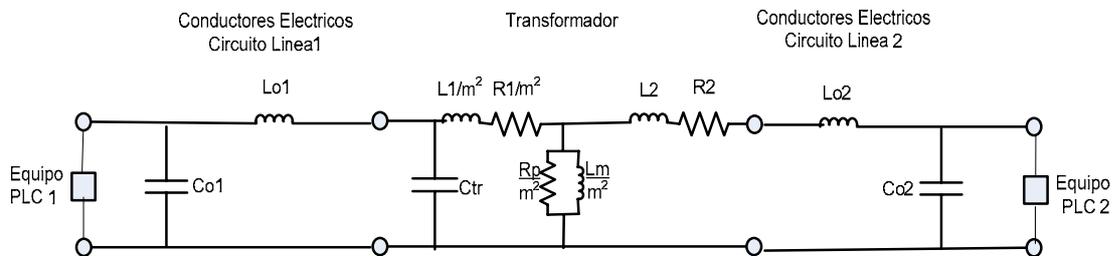
Al colocar números en la ecuación, se puede ver que la impedancia entre los dos equipos es ahora considerable, y los efectos son la atenuación de la señal debido a la alta inductancia entre los dos equipos. Sin embargo, este es un ambiente ideal, el cual nunca se presentara, ya que los equipos se conectan en circuitos por lo que la longitud de los conductores se tiene que tomar en cuenta. La figura 45 muestra la conexión en circuitos conectados a diferentes líneas del transformador, sin otro tipo de carga, y la figura 46 muestra su circuito equivalente.

Figura 45. Conexión de dos equipos PLC a dos líneas diferentes, en un circuito 120/240 Volts, tomando en cuenta el conductor eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Circuito equivalente para el diagrama de la figura 45



Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $Co1$ es la capacitancia de los conductores del circuito de la línea 1
- $Lo1$ es la inductancia de los conductores del circuito de la línea 1
- $Co2$ es la capacitancia de los conductores del circuito de la línea 2
- $Lo2$ es la inductancia de los conductores del circuito de la línea 2

Los demás parámetros son los mismos que los del circuito de la figura 44.

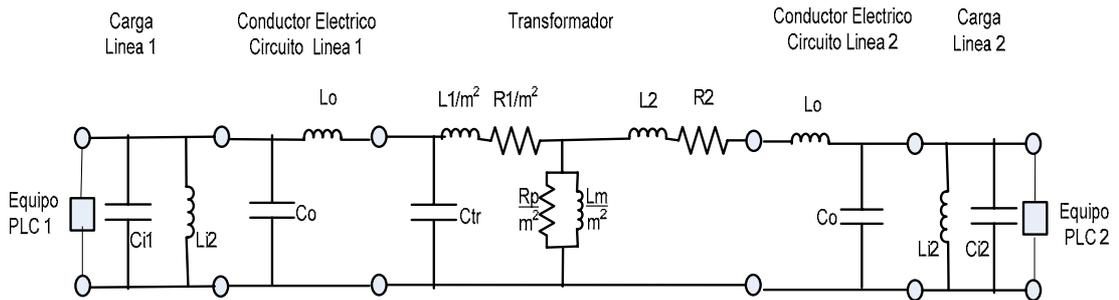
La impedancia entre los circuitos sería la siguiente:

$$Z_{total} = Z_{linea 1} + Z_{Transformador} + Z_{linea 2}$$

Donde $Z_{linea 1}$ y $Z_{linea 2}$ pueden ser calculados con la ecuación 11.1.1.3 y $Z_{transformador}$ con la ecuación 11.3.2.

Lo anterior se logra teniendo el ambiente sin carga. Al conectar los diferentes tipos de carga al circuito, este se complica aún más, ya que hay que considerar los efectos de esta, por lo que el circuito equivalente sería el siguiente:

Figura 47. Circuito equivalente de dos equipos PLC conectados en líneas diferentes de un circuito 120/240 V, tomando en cuenta las impedancias del transformador, los conductores y las cargas.



Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Ci1 es la capacitancia de la carga del circuito de la línea 1
- Li1 es la inductancia de la carga del circuito de la línea 1
- Ci2 es la capacitancia de la carga del circuito de la línea 2
- Li2 es la inductancia de la carga del circuito de la línea 2

La impedancia del circuito final sería la siguiente:

$$Z_{\text{total}} = Z(\text{línea1, carga1}) + Z_{\text{transformador}} + Z(\text{línea2, carga2})$$

Donde $Z(\text{línea1, carga1})$ y $Z(\text{línea2, carga2})$ se calcula con la ecuación 11.1.2.1, y $Z_{\text{transformador}}$ con la ecuación 11.3.2.

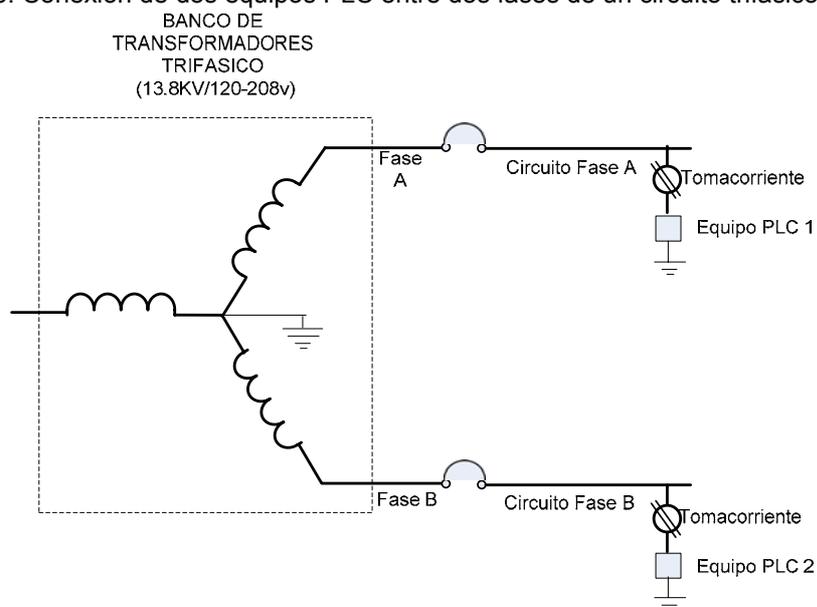
Podemos ver ahora la gran diferencia que existe al tener solo los equipos conectados en un simple circuito, y la que existe al ponerle cargas y al usar líneas diferentes en un circuito. El resultado debido a las inductancias de las

líneas y transformador en serie y los capacitancias de las cargas, transformador y líneas en paralelo es una atenuación en la señal y una posible dispersión de las señales las cuales puede tomar otra ruta y no llegar a su destino final, teniendo una pérdida de información.

11.4 Análisis en circuitos trifásicos

Al tener en una industria o comercio el servicio de alimentación trifásica, se tiene un banco de transformadores que proporciona generalmente el voltaje de salida 120 Volts entre una fase y neutro y si tiene la conexión estrella, entre fases se mide el voltaje 208 Volts. Este es el voltaje más usado en nuestro medio para el comercio y la pequeña industria, quienes son potenciales clientes de obtener un servicio como este, por lo cual será el sistema que analizaremos. El diagrama de conexión de dos equipos PLC en un sistema trifásico es el mostrado en la figura 48.

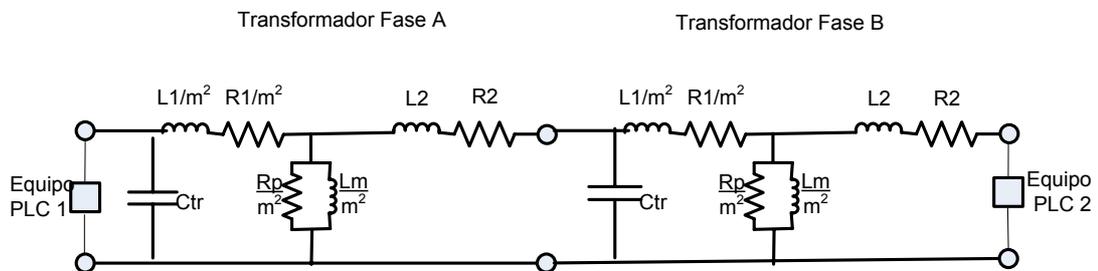
Figura 48. Conexión de dos equipos PLC entre dos fases de un circuito trifásico.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, ahora para llegar la señal de un equipo PLC a otro debe atravesar los transformadores de la fase A a la fase B. Si se colocan los equipos PLC en la salida de los transformadores, el circuito equivalente sería el mostrado en la figura 49.

Figura 49. Conexión de dos equipos PLC, directamente a la salida de los transformadores trifásicos.

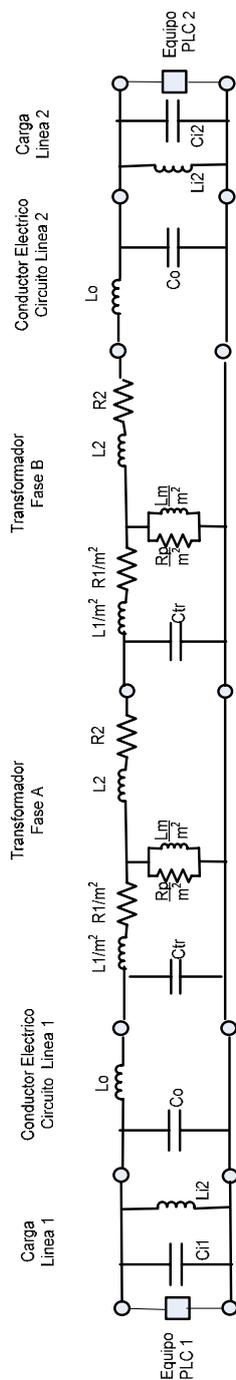


Fuente: Elaboración propia

Los parámetros son los mismos que los de la figura 47.

Al agregar los conductores eléctricos y las cargas al circuito, el diagrama final sería el que aparece en la figura 50. Como se puede observar, quedo un ambiente muy complicado por el cual la señal debe viajar de un equipo PLC al otro debido a que se debe viajar por el banco de transformadores, los conductores y tomar en cuenta la carga de los circuitos. Los efectos son aún mayores que en el caso de circuitos monofásicos, sobre todo porque hay más inductancia en el circuito y la atenuación es mayor.

Figura 50: Conexión de dos equipos PLC en dos fases distintas, teniendo en medio los conductores y las cargas.



Fuente: Elaboración propia

11.5 Análisis de los ruidos eléctricos producidos por los equipos conectados al sistema eléctrico

Al aplicar el teorema de Shannon (ecuación 6.2.1), se encuentra que el ruido afecta a la velocidad de transmisión de las señales, reduciendo su ancho de banda. Esto afecta a los servicios que presta, teniendo como consecuencia la degradación de estos, afectando su calidad y eficiencia. Cada equipo conectado al sistema produce un tipo diferente de ruido, y al sumarse estos se tiene el efecto del ruido total sobre las señales, ya que comparten el mismo medio.

Teóricamente, para calcular la capacidad de transmisión de una señal PLC, si usa modulación OFDM es la expresada en la siguiente ecuación:

$$Ch = 7.25 B \quad (11.5.1)$$

Donde:

-Ch es el ancho de banda del canal en bits

-B es el ancho de banda de la frecuencia en hertz

En otras palabras, se pueden transmitir 7.25 Megabits por cada Hertz transmitido (Mb/Hz). Si se hacen cálculos y se usa el ancho de banda máxima que puede dar un equipo PLC (30 MHz), tendríamos una capacidad de transmisión de 290 MHz. Pero esto es simplemente teoría. Desde su fabricación los equipos presentan limitantes. Muchos equipos PLC trabajan ya a 200 Mega bits como ancho de banda máximo, no llegando a los 290 teóricos. Los equipos interiores más utilizados trabajan en frecuencias entre 4 y 20 MHz, y dan un

ancho de banda de 85 Megabits, y los exteriores están comprendidos entre anchos de banda de 3 y 148.5 KHz y proporcionan anchos de banda entre 14 y 45 Megabits.

Esto muestra aún más que no se aplica la ecuación 11.5.1 en PLC, ni aún en ambiente ideal, ya que en 20 MHz y un ancho de banda de 85 Megabits, que es como funcionan muchos equipos, se transmiten 4.25 Mb/Hz. Este es un caso y por cada equipo puede hacerse un análisis propio. Tomando como base los anchos de banda dado por el fabricante y no la ecuación 11.5.1, la cual vimos que no se cumple, determinaremos como afecta el ruido de los equipos del sistema eléctrico a la capacidad de transmisión.

Para hacer el cálculo de cómo afecta un equipo o aparato individual al ancho de banda de la señal, utilizaremos el teorema de Shannon escrito de la siguiente forma:

$$C_h = B \log_2 (1 + 10^{(SNR/10)}) \text{ [bits/seg]} \quad (11.5.2)$$

Donde:

- Ch es el ancho de banda del canal en bits
- B es el ancho de banda de la frecuencia en hertz
- SNR es la relación señal ruido de un equipo determinado, en dB

En la última generación para equipos interiores, el ancho de banda pueden estar en valores entre 1.4 y 30 Mhz, y para equipos exteriores entre los 3 a 148.5 KHz. Los valores máximos de frecuencia a los cuales los equipos pueda transmitir también están limitados por la inductancia y capacitancia del conjunto cargas y la línea.

La relación de señal ruido de cada equipo puede ser calculada dividiendo el valor del cuadrado del valor eficaz de la señal de comunicaciones, dentro del valor del cuadrado del valor eficaz de la onda de ruido generada por el equipo a una frecuencia dada. En la práctica, determinar estos parámetros es bastante complicado, por lo cual hay otras formas de averiguarlo. La más sencilla es midiéndolo directamente del sistema mediante un equipo especializado para medir ruidos, pero es necesario tener la instrumentación adecuada.

Otra forma es conociendo el ruido que genera cada equipo. Se puede investigar, y ver cuál es el tipo de ruido que inyecta cada equipo al sistema eléctrico. Muchos fabricantes indican en sus manuales el ruido eléctrico que producen los equipos, en dimensionales de Decibelio Volt (dBV) o Decibelios Milivolt (dBv), las cuales son formas de indicar la relación entre el ruido y un Volt o un Milivolt sin importar la impedancia del circuito. Las ecuaciones para hacer estos cálculos son las siguientes:

$$1 \text{ dBV} = 20 \log \frac{V_{\text{RMS Ruido}}}{1 \text{ Volt}} \quad (\text{un Decibelio Volt}) \quad (11.5.3)$$

$$1 \text{ dBv} = 20 \log \frac{V_{\text{RMS Ruido}}}{0.001 \text{ Volt}} \quad (\text{un Decibelio Milivolt}) \quad (11.5.4)$$

Un voltaje se puede expresar en términos de Decibelios Volt, mediante la anterior expresión, el cual se denomina “nivel de ruido” y generalmente se simboliza con la letra “L”. Para no confundirlo con la inductancia, lo denominaremos como “Ln”. Las señales de PLC, en sus valores máximos pueden variar entre 2 y 2.5 Volts, que son los valores más utilizados para los cálculos. Debido a que este será el valor sobre el cual se calculará la SNR (Vs en la ecuación 6.3.2), denominaremos Ls al valor en dBV para este voltaje, el

cual sería cualquiera de los siguientes valores, con base a las ecuaciones 11.5.3 y 11.5.4.

Para una señal PLC, tomando como base 2 Volts de valor pico:

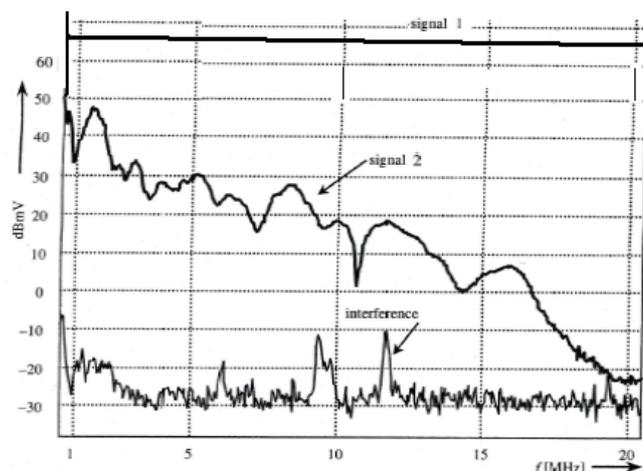
$$L_s = 20 \log (2/\sqrt{2}) = 2.98 \text{ dBV} \quad \text{o} \quad L_s = 20 \log \frac{(2/\sqrt{2})}{0.001} = 63 \text{ dBv}$$

Para una señal PLC, tomando como base 2.5 Volts de valor pico:

$$L_s = 20 \log (2.5/\sqrt{2}) = 4.95 \text{ dBV} \quad \text{o} \quad L_s = 20 \log \frac{(2.5/\sqrt{2})}{0.001} = 65 \text{ dBv}$$

Cualquiera de estos valores son muy comunes de encontrarse en los libros de texto de PLC. En la siguiente gráfica puede observarse una señal de PLC que parte con un valor de “Ls” a 65 dBv (1) y llega con diferentes valores a su destino (2), según la frecuencia a la que es transmitida.

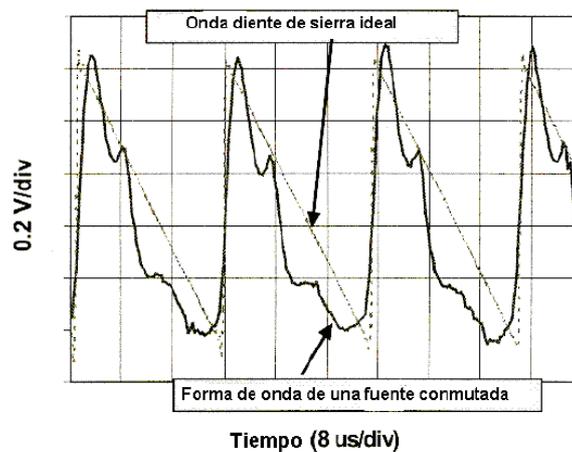
Figura 51. Ls como sale del equipo (señal 1) y como llega (señal 2) a diferentes frecuencias



Fuente: Klaus Dostert. Power Line Communications, página 252

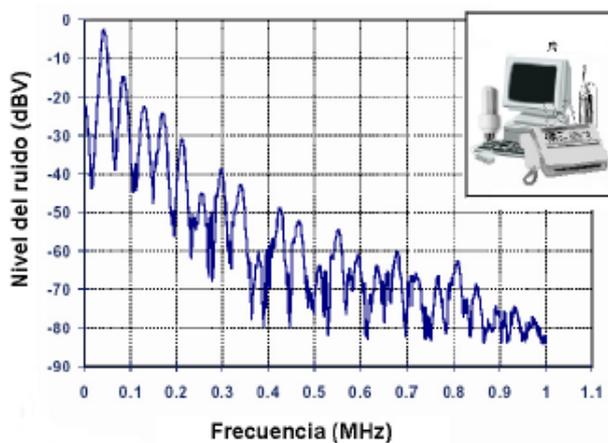
Los equipos como los balastos electrónicos, o los de computo con fuente conmutada, producen un ruido eléctrico muy parecido al diente de sierra, como el mostrado en las figuras 52 y 53, incluyendo su densidad espectral.

Figura 52. Ruido producido por una fuente conmutada. Tiene una semejanza a la onda diente de sierra.



Fuente: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

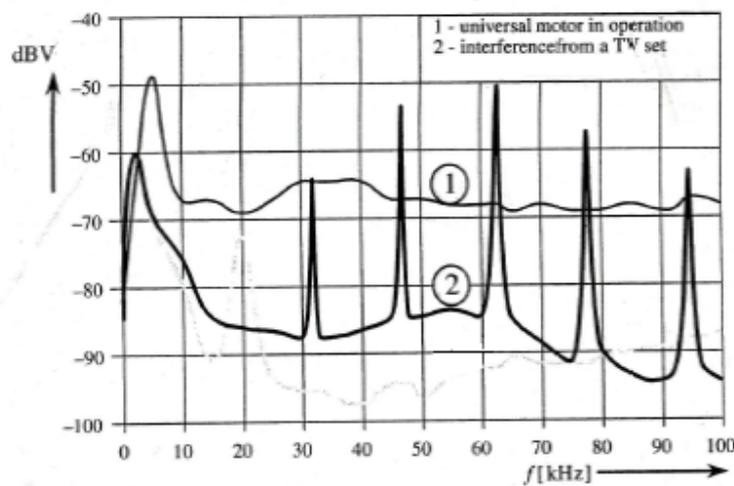
Figura 53. Densidad espectral del ruido de un equipo con fuente conmutada



Fuente: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

En la siguiente gráfica, puede verse la densidad espectral del nivel de ruido producido por un motor universal y un equipo de televisión convencional, expresado en dBV.

Figura 54. Densidad Espectral de un motor universal y un equipo de TV



Fuente: Klaus Dostert. Power Line Communications, página 36.

Las gráficas son bastante útiles y muestran los efectos que tendrá el ruido producido por estos equipos a las señales que se transmiten a diferentes frecuencias. Por medio de estos valores, se puede calcular el voltaje promedio (RMS) del ruido eléctrico generado por el equipo, y en base a esto calcular la relación señal ruido (SNR) con respecto a la señal de comunicaciones.

En un sistema eléctrico, entre más grande es el valor de la SNR, la transmisión de señal es mejor, y entre más pequeño sea, el ambiente es menos indicado para la transmisión de la señal. En la tabla I se indica los efectos que

se tienen en un sistema eléctrico con base al valor del SNR de los equipos del sistema.

Tabla I. Valores de SNR y su significado

Valor (dB)	Causa	Significado
$SNR = \infty$	$N = 0$	No hay ruido en el circuito. Únicamente está la señal de comunicaciones
$SNR > 0$	$S > N$	La amplitud de la señal de comunicaciones es mayor que la del ruido
$SNR = 0$	$S = N$	La amplitud de la señal de comunicaciones es igual que la del ruido
$SNR < 0$	$S < N$	La amplitud de la señal de comunicaciones es menor que la del ruido

Esto se debe a que si no hay equipos conectados en el circuito, no hay voltaje de ruido (teóricamente). En la ecuación 6.3.2, al dividir dentro de cero, que es el voltaje del ruido, queda un logaritmo de infinito, que es también infinito, y por consiguiente la SNR es infinito. Esto indica que no hay limitantes a transmisión de bits por segundo debido al ruido.

Si el voltaje del ruido es muy pequeño, menor al voltaje de la señal de comunicaciones, la división en la ecuación 6.3.2 da un valor grande, el cual tiene un logaritmo mayor que uno y por consiguiente una SNR positiva y de alto valor, lo indica que una capacidad de transmisión de bits alta.

Si el voltaje del ruido es muy grande, mayor a la señal de comunicaciones, la división de la ecuación 6.3.2, quedara un número menor que uno, y el logaritmo de un número así es negativo. Esto produce una SNR negativa, de bajo valor, y la capacidad de transmisión es muy baja. Igual si el voltaje del ruido es igual al de la señal de comunicaciones, la SNR es cero, indicando también una baja capacidad de transmisión de datos.

Para calcular la relación señal ruido, puede leerse el valor “L” de las gráficas anteriores, en dBV. Por ejemplo, en la figura 50, para un valor de 100 MHz se tiene un nivel de ruido de -45 dBV. Con este valor se puede hacer el cálculo mediante la ecuación 11.5.3 para encontrar el voltaje del ruido, el cual estaría expresado de la siguiente forma:

$$V_n = 10^{L_n/20} \text{ [V]} \quad (11.5.5)$$

Donde:

- V_n es el voltaje producido por el ruido de un equipo, medido en V

-L es el nivel ruido de un equipo, medido en dBV

La SNR del equipo se puede calcular con base a los valores L_s . Tomaremos como base el valor de 2 Volts (1.41 Volts RMS). Al sustituir la ecuación 11.5.5 en la ecuación 6.3.2. Si estas ecuaciones se relacionan entre sí, la relación señal ruido puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\text{SNR} = 20 \log (10^{(L_s - L_n)/20}) \text{ [dB]} \quad (11.5.6)$$

Donde:

- L_s es el nivel de ruido de la señal PLC (puede tomarse 2.98 dBV)

- L_n es el nivel de ruido de la señal que interfiere a L_s , en dBV.

Cuando no se logra conseguir información del nivel de ruido que produce un equipo determinado, no queda otro camino que calcular el voltaje del ruido

que produce. A continuación, se analizarán los diferentes tipos de ruido generados por los equipos de potencia y la forma de calcular sus voltajes.

11.5.1 Ruidos producidos por voltajes de línea

Los voltajes de los conductores eléctricos, producen ruido de intermodulación. Este es tipo de ruido es el que menos afecta a las señales, ya que a pesar de tiene la amplitud más alta de todas las ondas que hay en el conductor, los equipos PLC traen filtros que separan la señal PLC de la tensión de servicio, razón por la cual se logra transmitir a la máxima cantidad de bits por segundo para los cuales los equipos PLC están diseñados cuando no hay otra carga en las líneas, solo el voltaje.

11.5.2 Ruido producido por equipos que generan armónicos

Los armónicos en el sistema son ruidos que degradan la comunicación, debido a que son múltiples señales de diferentes frecuencias que circulan en el sistema. Los armónicos generan ruido correlacionado y para determinar la forma en que pueden limitar el ancho de banda se debe de determinar el valor de la distorsión armónica total (THD), el cual es la relación de los voltajes RMS de los armónicos superiores con la amplitud RMS de la frecuencia fundamental. El THD se expresa en valores porcentuales. Se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{THD} = \frac{V(a)}{V(\text{fund})} \times 100\% \quad (11.5.2.1)$$

$$V(a) = \sqrt{V1^2+V3^2+V5^2+....Vn^2} \quad (11.5.2.2)$$

Donde:

-V(a) es la suma cuadrática de los voltajes medios RMS de las armónicos superiores.

-V(fund) es el voltaje RMS de la frecuencia fundamental

El valor V(a) es difícil de calcular, sin embargo el valor THD puede ser medido de una red eléctrica por medio de un analizador de potencia, y por medio de este se puede calcular el valor de V(a), ya que se conoce el valor RMS del voltaje de la frecuencia fundamental (120 v). Por lo que el valor de V(a) quedaría:

$$V(a) = \frac{THD \times V(fund)}{100} \quad (11.5.2.3)$$

Visto desde el punto de vista de la señal de comunicaciones, el valor de V(a) es el promedio de las amplitudes RMS de las señales armónicas, por lo que por medio de este podemos determinar el ruido, calculando el SNR que producen los armónicos mediante su valor V(a) a la señal de comunicaciones, mediante la siguiente ecuación:

$$SNR(arm) = 20 \log \frac{Vs}{V(a)} = 20 \log \left(\frac{Vs \times 100}{THD \times V(fund)} \right) \quad [dB] \quad (11.5.2.4)$$

Donde:

-Vs es el valor RMS de la señal de comunicaciones

- V(a) es la sumatoria cuadrática de los valores RMS de los armónicos superiores
- THD es el valor de la distorsión armónica total
- V(fund) es el valor del voltaje fundamental

Para el V(fund) se puede utilizar el valor de 120V y para Vs se puede utilizar 1.41 V. El resultado de SNR(arm) lo colocamos a la ecuación 11.5.2 y de esta forma se puede calcular la capacidad de transmisión de una señal de comunicaciones en un circuito donde hay armónicos:

$$C_h = B \log_2(1 + 10^{(SNR(arm)/10)}) \quad (11.5.2.5)$$

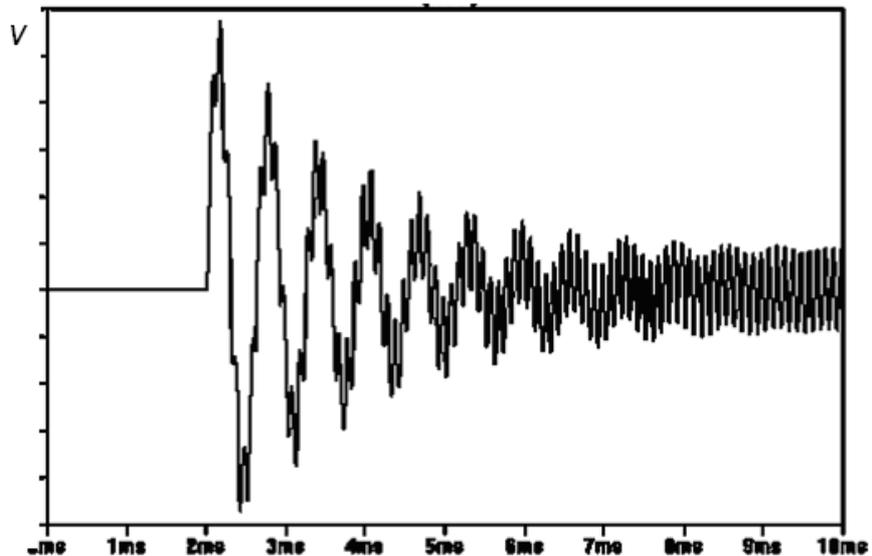
Donde:

- B es el valor del ancho de banda de la frecuencia, medidos en hertz
- SNR(arm) es el valor de la relación señal-ruido de los armónicos a la señal de comunicaciones, en Decibelios.

11.5.3 Ruidos producidos por equipos que generan transitorios

Los equipos que producen transitorios, generan inestabilidades en el sistema, debido a los abruptos cambios en las formas de las ondas, las cuales varían con el tiempo. Interruptores de circuitos, controladores de formas de onda, fallas, motores eléctricos al arrancar y otros, generan transitorios. La forma de onda debido a un transitorio puede ser la que se muestra en la figura 55.

Figura 55. Forma de onda de un transitorio

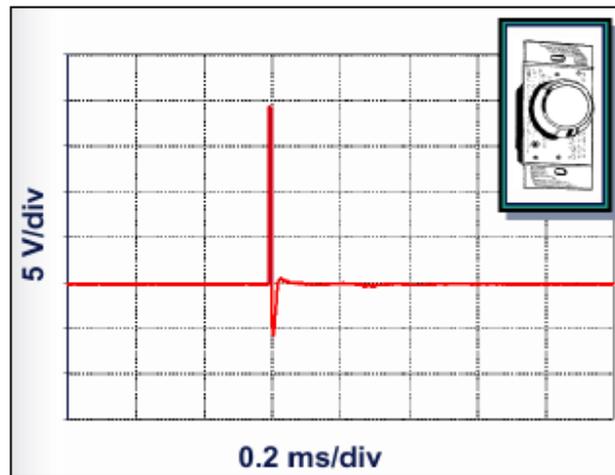


Fuente: <http://books.google.com/>

Los transitorios generados por interruptores de circuitos y arranques de motores, generan transitorios variables en el tiempo los cuales se pueden calcularse mediante la ecuación 6.2.2, si se conoce la forma de ecuación de la señal variable en el tiempo. Sin embargo, los efectos producidos tardan fracciones de segundo, por lo que únicamente afectan la transmisión de datos durante este tiempo, reestableciéndose al finalizar el transitorio y entrar de nuevo en régimen permanente.

Otros dispositivos como los circuitos de control (*dimmers*) recortan la onda sinusoidal de la red, generando transitorios en el momento que se activan. Los transitorios que generan son de la forma que se muestra en la gráfica de la figura 56.

Figura 56. Forma de onda de un transitorio producido por un *dimmer*



Fuente: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

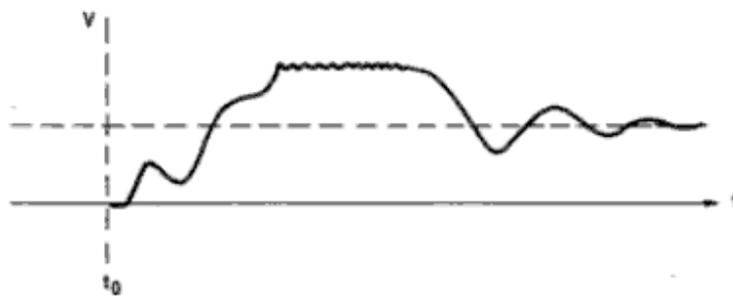
El *dimmer* genera transitorios instantáneos, los cuales generan ruido por un lapso de tiempo muy pequeño, y aunque se baja el ancho de banda digital durante este lapso, el tiempo es muy pequeño para que pueda ser perceptible por los equipos.

También están los transitorios debido a los arcos eléctricos, el cual es un fenómeno de descarga en un medio gaseoso (aire ionizado) que se produce como consecuencia del intento de interrupción brusca de la corriente. Sin embargo para este caso, no existe una conducta gaussiana, por lo que determinar matemáticamente una expresión es complicado. Las distorsiones generadas son como las que se muestran en la gráfica de la figura 57.

Los efectos son una caída en el ancho de banda digital (transmisión de bits) durante el tiempo del transitorio, el cual por ser pequeño puede pasar

desapercibido, ya que el ancho de banda nominal se reestablece al terminar el transitorio.

Figura 57. Transitorio generado por un arco eléctrico



Fuente: <http://books.google.com/>

11.5.4 Ruido producido por inducción

Los campos magnéticos generados en los conductores por las corrientes y en el ambiente, cambiantes en el tiempo, generan fuerza electromotriz autoinducida, lo cual también es ruido que afecta a las señales de comunicaciones. El valor de los voltajes inducidos se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$V = - n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (11.5.4.1)$$

Donde:

-V es el voltaje inducido

- Φ es el flujo magnético

-n es el número de conductores

El valor de V calculado se puede considerar como ruido y aplicar a la ecuación 6.3.2 para calcular el SNR y luego a la ecuación 11.5.2 para calcular la cantidad de bits que pueden ser transferidos debido a las inducciones.

11.5.5 Análisis del ruido en los transformadores de potencia

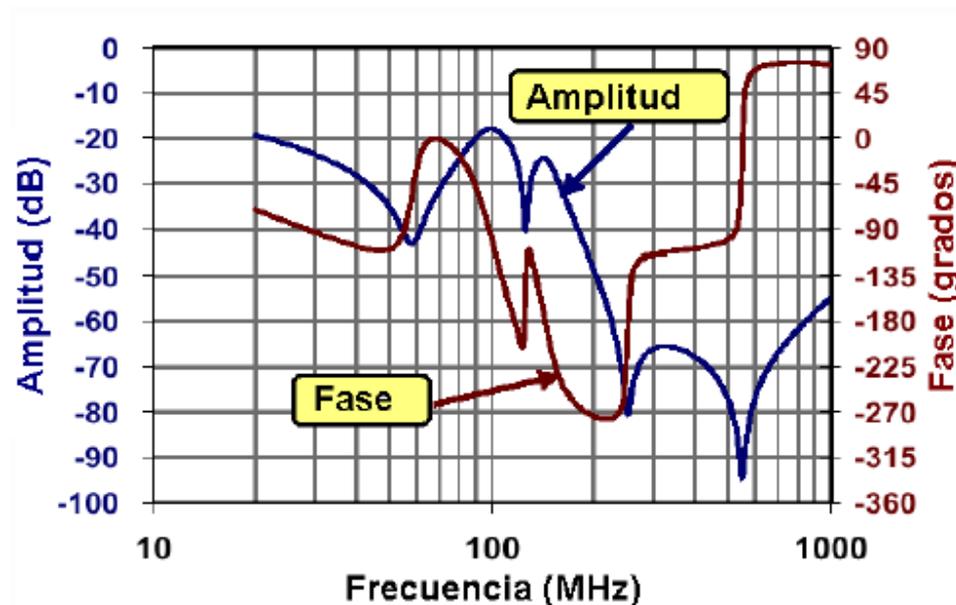
Al atravesar una señal de comunicaciones un transformador para poder llegar de una fase a otra, adicionalmente a las inductancias y capacitancias que le causan atenuaciones, los ruidos que existen en el transformador degradan de gran manera la señal, incidiendo grandemente en la velocidad de transmisor y como consecuencia, en la calidad del servicio. Al aplicar el teorema de Shannon (ecuación 11.5.2) para determinar el ancho de banda digital de las señales, conociendo la frecuencia de transmisión, la cantidad de transmisión de bits baja considerablemente después de atravesar el transformador.

Para calcular lo anterior, debe conocerse la relación de señal ruido (SNR) del transformador, lo cual matemáticamente es muy difícil de calcular, debido a la cantidad de ruidos eléctricos que hay en él, ya que aparte de los ruidos propios que se generan en el equipo, absorbe los ruidos de todo el sistema los cuales llegan a él por las líneas de potencia que alimentan los circuitos.

En el transformador se pueden encontrar todo tipo de ruido en forma de armónicos, transientes debido a conmutaciones en circuitos y fallas, calentamientos por saturación, corrientes y voltajes autoinducidos por los campos magnéticos, aparte de los voltajes y corrientes nominales de servicio. Todo esto es ruido para las señales de comunicaciones. En la figura 58 se

muestra un ejemplo de los ruidos que entran al transformador transportados por los conductores de energía eléctrica.

Figura 58. Ruido a la entrada de un transformador el cual es llevado por los conductores desde las cargas.



Fuente: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>

Cada ambiente es específico, y requiere un análisis individual. La forma más fácil de conocer el nivel de ruido eléctrico que produce un transformador, es mediante un sistema de monitoreo el cual indica la mayoría de parámetros de lo que sucede dentro de un transformador de potencia. Este tipo de sistema es denominado SMLTP (Sistema de Monitoreo en línea para Transformadores de Potencia).

Por medio de herramientas como estas se pueden conocer parámetros como ruido, capacitancias, temperaturas, distorsiones armónicas y otros, los cuales son de mucha utilidad. El valor de ruido medido se puede utilizar para calcular el valor de SNR y aplicarlo a la ecuación 11.5.2 para encontrar la cantidad de bits por segundo que pueden circular por el transformador, limitados por el ruido.

En un transformador se puede encontrar los siguientes ruidos:

- Ruido debido a la carga
- Ruido por armónicos
- Ruido por las ondas eléctricas (voltajes y corrientes)
- Ruido por transitorios
- Ruido externo por inducción debido a los campos magnéticos
- Ruido térmico

Para hacer los cálculos, los análisis hechos anteriormente son válidos para un transformador de potencia (ruido por armónicos, ondas eléctricas, transitorios y por inducción). El único ruido que no se ha analizado es el térmico, ya que un parámetro a tomar considerablemente en cuenta en un transformador es la temperatura, ya que el nivel de calentamiento que presenta un transformador de potencia es considerable, comparado al que presentan los conductores en los circuitos. A continuación se hará un análisis del ruido por calentamiento en los transformadores.

11.5.5.1 Ruido térmico en los transformadores de potencia

El calentamiento genera ruido térmico. La potencia de este (N) está expresada por la siguiente ecuación:

$$N = KTB \quad [\text{watts}] \quad (11.5.5.1)$$

Donde:

- N es la potencia del ruido térmico
- K es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
- T es la temperatura (en grados Kelvin)
- B es el ancho de banda de la frecuencia en hertz

También puede darse una potencia relativa de ruido (N_o), por hertz, al dividir la anterior ecuación dentro del ancho de banda, quedando la ecuación:

$$N_o = KT \quad [\text{watts/hertz}] \quad (11.5.5.2)$$

Para temperatura ambiente promedio se puede tomar el valor de 17°C (290°K). Por lo que a esta temperatura, la potencia relativa sería de 4×10^{-21} W/Hz. Un transformador de potencia 13800/120 Volts trabaja en promedio a unos 80°C (353°K), sin embargo esta es cambiante debido a la carga y al medio ambiente, si es que está a la intemperie, por lo que para cada caso es individual y debe verse el valor de temperatura a la cual trabaja directamente del termómetro medidor de cada equipo.

Al conocer la potencia del ruido térmico (N), se puede encontrar el valor del voltaje disipado por la resistencia del transformador, debido al ruido. En el peor de los casos, cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia de pérdida, el voltaje que se disipa por el ruido es $V_n/2$ (V_n es el voltaje del ruido). La ecuación, en base de que la potencia es igual al cuadrado del voltaje dividido

la resistencia, en el peor de los casos (máxima transferencia de potencia), se deduce de la siguiente forma:

$$N = \frac{(V_n/2)^2}{R} = \frac{V_n^2}{4R} = KTB$$

$$V_n = \sqrt{4RKT B} \quad (11.5.5.3)$$

Donde:

- V_n es el voltaje disipado por el ruido
- R es la resistencia del secundario del transformador
- T es la temperatura del transformador, en grados kelvin
- K es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
- B es el ancho de banda de la frecuencia, en hertz

Al conocer el voltaje disipado por el ruido, se puede encontrar el valor de la relación SNR del ruido térmico (SNR_t) mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{SNR}_t = 10 \log \frac{V_s^2}{V_n^2} = 10 \log \frac{V_s^2}{4RKT B} \quad (11.5.5.4)$$

Donde:

- V_s es el RMS de la señal de comunicaciones

La ecuación final quedaría para calcular la cantidad de bits que pueden circular por un transformador con ruido térmico:

$$C_h = B \log_2 (1 + 10^{(\text{SNR}_t/10)}) \quad (11.5.5.5)$$

Los parámetros son los mismos que la ecuación 11.5.5.4.

Con esto se ha calculado únicamente los efectos del ruido térmico. Se debe de hacer el análisis respectivo para cada tipo de ruido y luego la calcular la relación señal-ruido global. Este punto se analizará en la siguiente sección.

11.6 Efectos de ruidos de diferentes equipos a la señal de comunicaciones

Hasta el momento, se ha analizado el efecto de un equipo individual sobre una señal de comunicaciones y el efecto que hace un solo tipo de ruido. Esto es valido solo si hay un equipo de cualquier tipo conectado en el mismo circuito donde circula la señal. Al tenerse varios equipos, la situación cambia y hay que encontrar el valor de la relación señal-ruido de todo el sistema. Por medio de analizadores de ruido se pueden hacer estas mediciones, como se ven en la gráfica de la figura 59, donde se hizo un análisis de ruido en la instalación de un edificio de dos niveles, mostrando la densidad espectral de cada uno de ellos.

Para poder calcular la relación señal-ruido total del sistema (SNRs), se necesita conocer las amplitudes de todas las ondas eléctricas que interfieren a la señal de comunicaciones, y encontrar su valor eficaz total, mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2 + V_d^2 + \dots + V_n^2} \quad (11.5.5.6)$$

$$SNRs = 20 \log \frac{V_s}{V_p} \quad (11.5.5.7)$$

Donde:

- V_p es el RMS de la amplitud de las ondas que producen ruido (V_a , V_b , V_c , etc)

- V_s es el valor RMS de la amplitud de la señal de comunicaciones

En varias ocasiones el valor de la amplitud de la ondas que producen ruido es difícil de calcular, sobre todo si se trata de armónicos u ondas inducidas. Sin embargo, si el valor SNR que los equipos que generan es conocido, calculado o se obtiene de gráficas, se puede encontrar el valor de la amplitud RMS de la onda que genera ruido por la siguiente ecuación:

$$V_n = \frac{V_s}{\sqrt{10^{(SNR/10)}}} \quad (11.5.5.8)$$

Donde

- V_n es el valor RMS de la amplitud del ruido

- V_s es el valor RMS de la señal de comunicaciones

-SNR es la relación señal ruido del equipo

Si se tienen varios equipos, denominados A, B y C con SNR conocido, y teniendo el valor de la señal de comunicaciones (para PLC es 2V de pico, su valor RMS es 1.41V), se puede encontrar el SNR del sistema substituyendo los valores de la ecuación 11.5.5.8 en la ecuación 11.5.5.6:

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{1}{10^{(SNR_a/10)}} + \frac{1}{10^{(SNR_b/10)}} + \frac{1}{10^{(SNR_c/10)}} + \dots + \frac{1}{10^{(SNR_n/10)}}}$$

(11.5.5.9)

Donde:

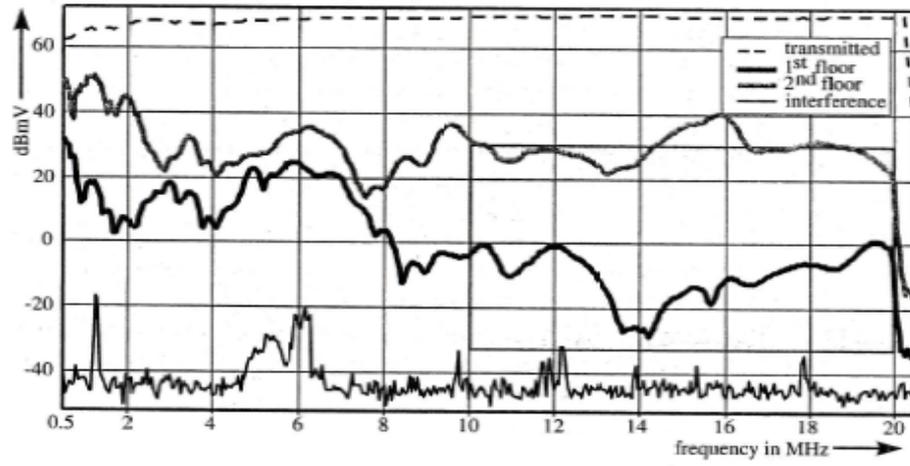
- Vp es el voltaje RMS promedio de los ruidos del sistema
- Vs es el voltaje RMS de la señal de comunicaciones
- SNRa, SNRb, SNRc...SNRn son las relaciones señal ruido de los equipos A, B, C hasta N, expresados en Decibelios.

Con lo anterior, se puede calcular la relación señal ruido del sistema eléctrico (ecuación 11.5.5.7) y luego la cantidad de bits que pueden ser transmitidos por el sistema se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_h = B \log_2(1+10^{(SNR_s/10)}) \quad (11.5.5.10)$$

El cálculo también puede servir para determinar la cantidad de bits que pueden ser transmitidos por un dispositivo que genere varios tipos de ruido, como el transformador de potencia.

Figura 59. Densidad espectral del ruido total de un edificio de dos niveles a la señal de comunicaciones, la cual tiene un valor de 63 dBV.



Fuente: Klaus Dostert. Power Line Communications, página 255.

12. PRUEBAS Y MEDICIONES DE CAMPO

Para poder demostrar lo anteriormente dicho y ver a fondo los problemas causados por los equipos de potencia a las señales de comunicaciones cuando comparten el mismo circuito, se harán varias pruebas piloto, tanto en circuitos sin carga, como con circuitos con una variedad de cargas y ambientes y así poder determinar que sucede en cada uno de ellos.

Se tomará la medida de velocidad de transmisión de bits, así como diferentes parámetros del circuito, como voltajes, corrientes, y armónicos. Para medir la velocidad de transmisión de datos se utilizara una herramienta que consiste en un *software* denominado Netgear Powerline Utility, el cual puede medir la velocidad de transmisión entre equipos PLC hechos por el mismo fabricante.

Los Equipos PLC a usar son de marca Netgear modelo XE103, los cuales pueden transmitir en condiciones ideales hasta una velocidad de 85 Megabits por segundo por medio de la red eléctrica, con frecuencias entre 4 y 30 MHz. El equipo con se tomaran las medidas de voltajes, corrientes y armónicos es un Analizador de Potencia marca Fluke, modelo 43B. Se realizaran las siguientes pruebas:

Prueba 1: Determinación de las pérdidas por el conductor:

- Conexión en el mismo punto, sin otro tipo de carga
- Conexión a 15 metros de distancia, sin carga
- Conexión a 30 metros de distancia, sin carga

-Conexión a 60 metros de distancia, sin carga

Prueba 2: Determinación de los problemas y pérdidas generados por los diversos equipos conectados en los circuitos:

- Conexión en un circuito de iluminación fluorescente
- Conexión en circuitos con cargas no lineales
- Conexión en un circuito con un motor universal
- Conexión en un circuito con un motor de inducción

Prueba 3: Determinación de los problemas y pérdidas generados por el cambio de fases y el tránsito de las señales de comunicaciones por transformadores de potencia:

- Conexión entre diferentes fases sin carga (circuitos trifásicos)
- Conexión entre diferentes fases con carga (circuitos trifásicos)

Prueba 4: Determinación de los problemas y pérdidas ocasionados al transmitir señales entre diferentes acometidas:

- Conexión exterior entre dos acometidas diferentes
- Conexión exterior entre servicios conectados al mismo transformador, pasando por los cables externos del servicio de energía eléctrica.

Prueba 5: Determinación de los problemas causados a los diferentes servicios:

- Transmisión de datos
- Transmisión de telefonía

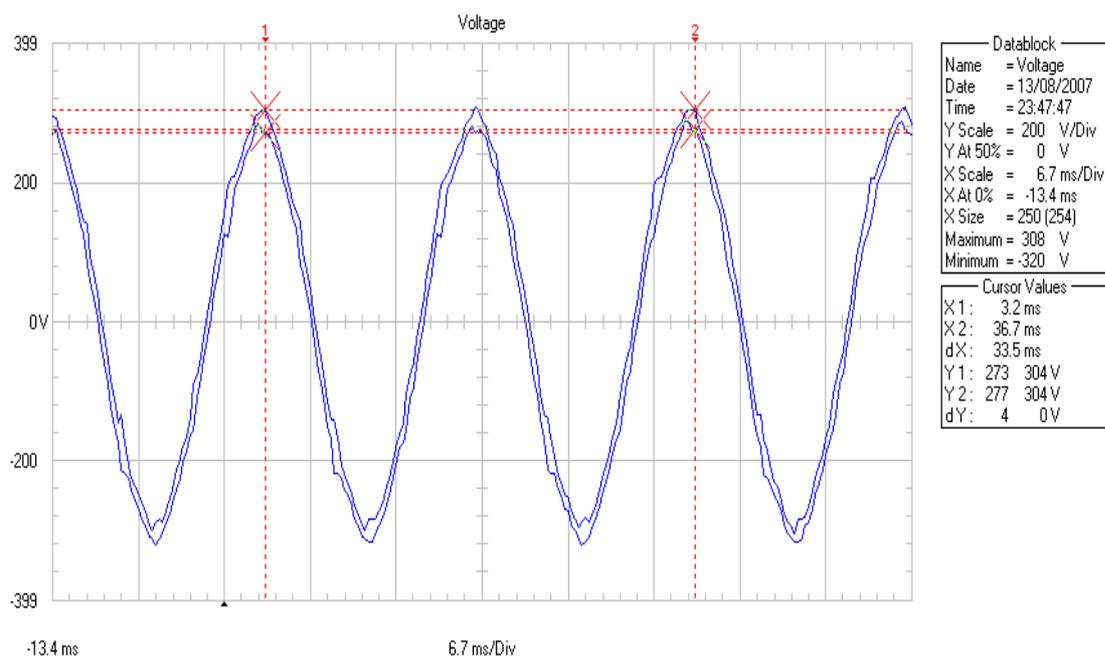
12.1 Ambiente de pruebas

Se armó un ambiente para pruebas piloto en un edificio de oficinas, un ambiente que es apto para poder poner a funcionar una red de comunicación por el sistema eléctrico. El edificio consta de un banco de transformadores de 75 KVA, trifásicos, recibiendo un voltaje de 13.8 KVA transformándolos a 208 Volts entre fase y fase, y 120 Volts entre fase y neutro (conexión estrella). Adicionalmente, posee un centro de impresión, el cual tiene equipo como maquinaria industrial y un *datacenter* (centro de almacenaje de datos de computación), el cual contiene todo tipo de equipo de computo de gran tamaño.

Se tomaron las mediciones en la salida del banco de transformadores, para analizar como estaba el sistema eléctrico y se obtuvieron las gráficas que aparecen en las siguientes figuras. En la figura 60, se puede ver la medición de la onda de salida del voltaje entre fase y fase, y en la figura 61 se puede ver la forma de la onda de corriente en una fase (es similar en todas las fases).

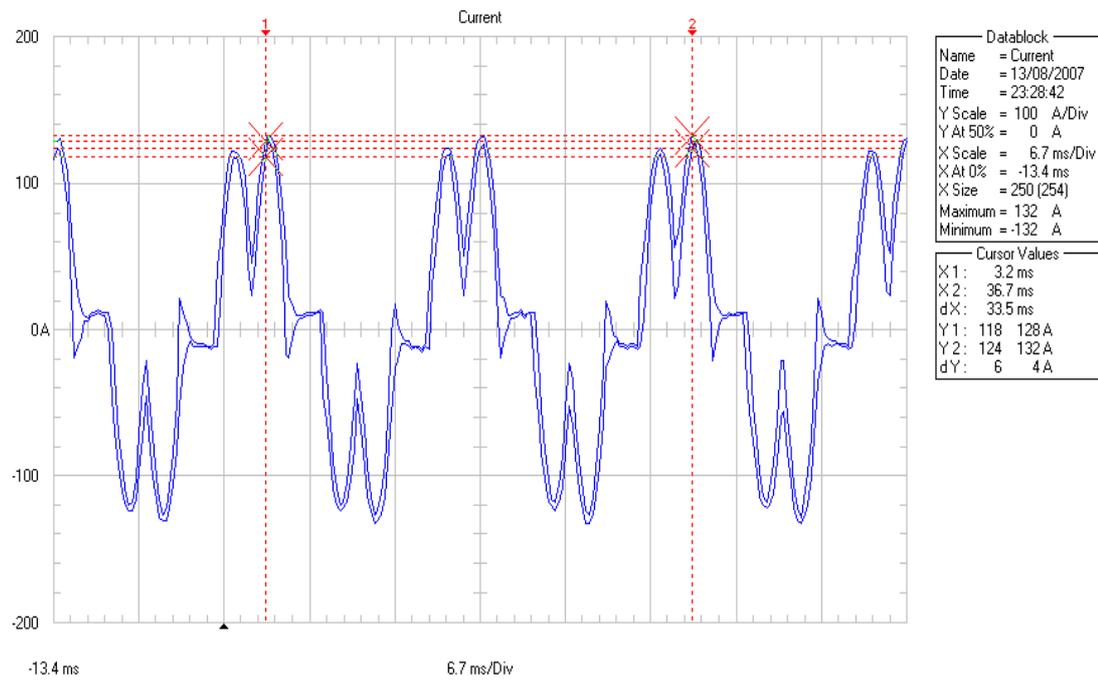
La figura 62 muestra la forma de onda del voltaje entre una fase y neutro. La figura 63 muestra la corriente que hay en el neutro. En la figura 64 se midieron las armónicos que hay en la corriente de una fase, y en la figura 65 se midieron las armónicos que hay en el voltaje entre una línea y neutro. La figura 66 muestra las armónicos que hay entre dos fases del transformador. La figura 67 muestra los armónicos que hay en la corriente de neutro.

Figura 60. Medición del voltaje entre fases a la salida del banco de transformadores.



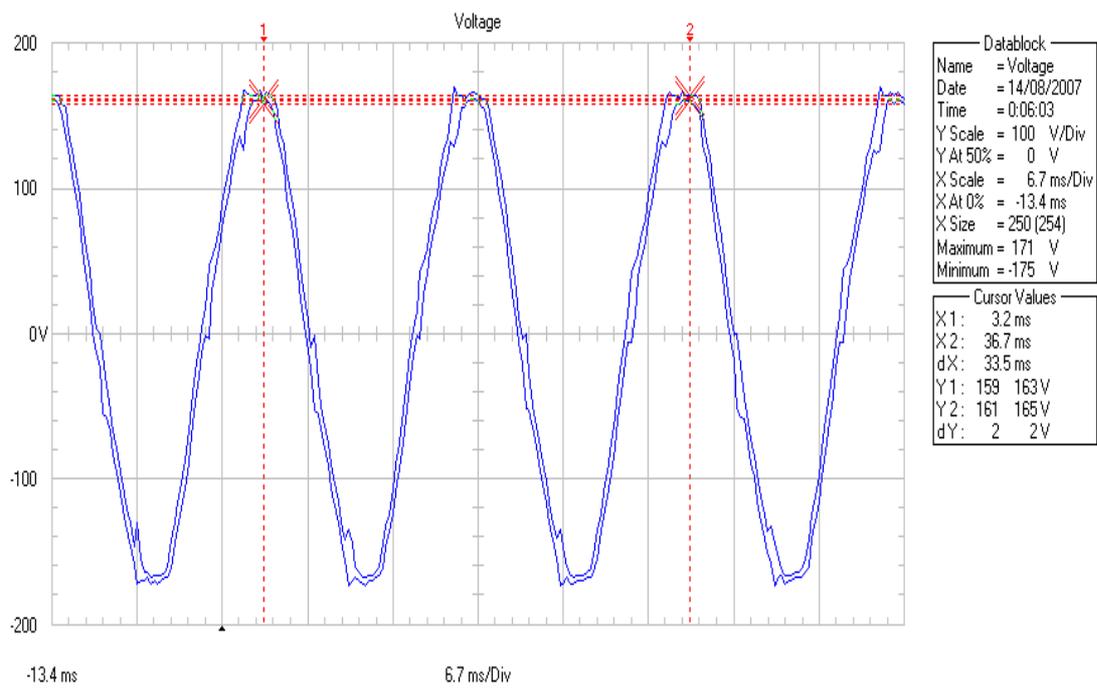
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 61. Corriente medida en una de las fases a la entrada del transformador (la forma de onda es similar en las 3 fases).



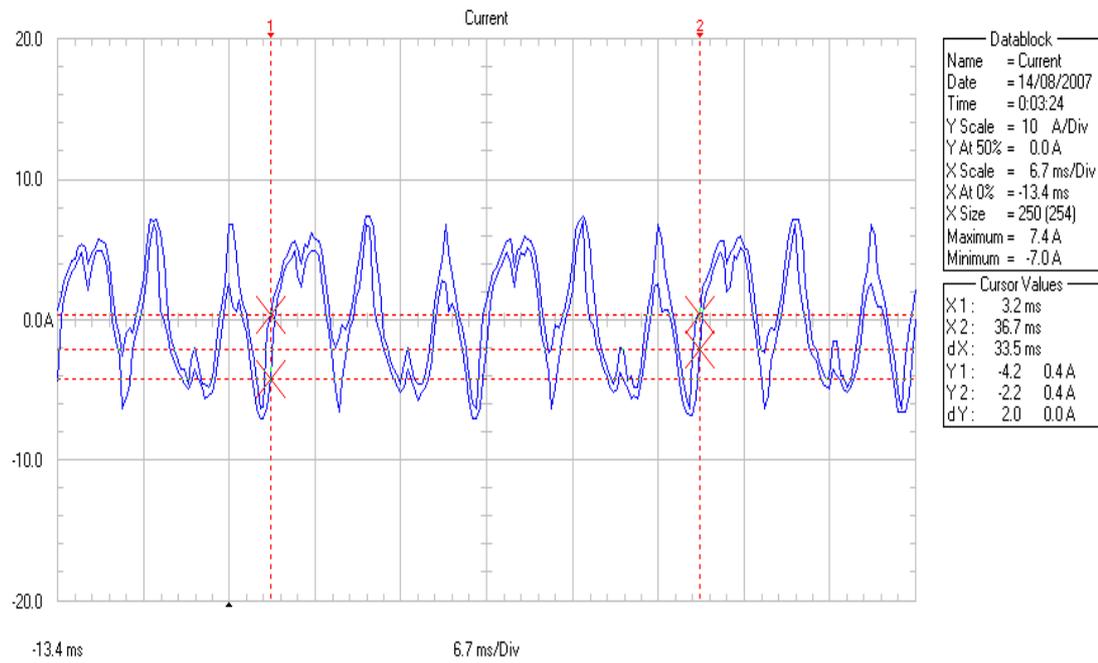
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 62. Voltaje medido entre una fase y neutro.



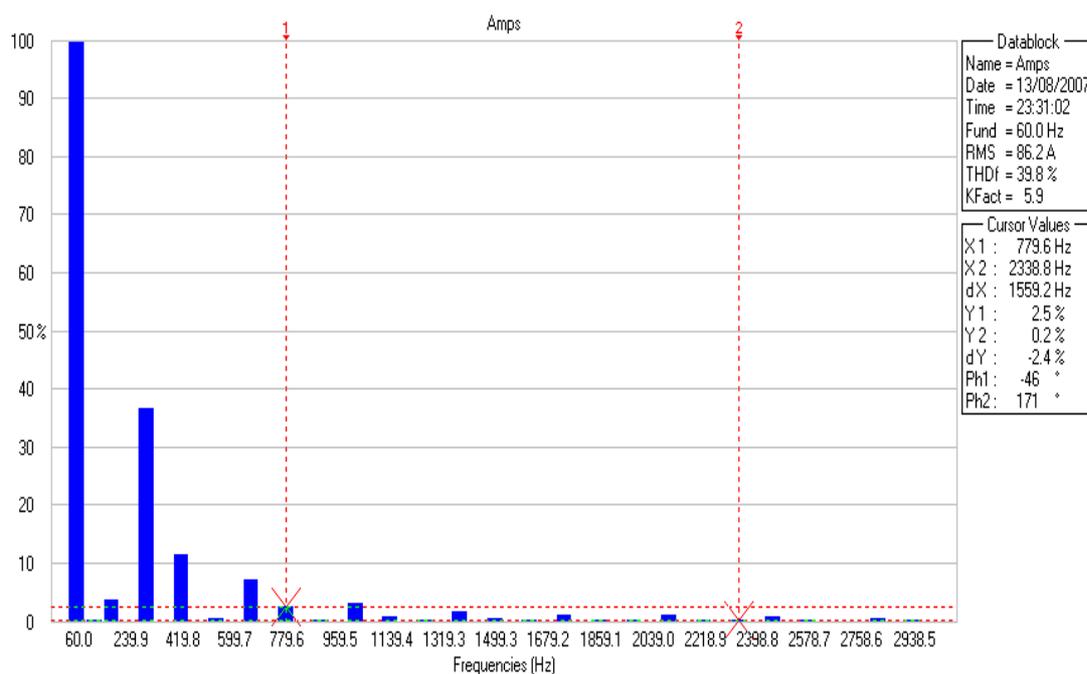
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 63. Corriente medida en el neutro.



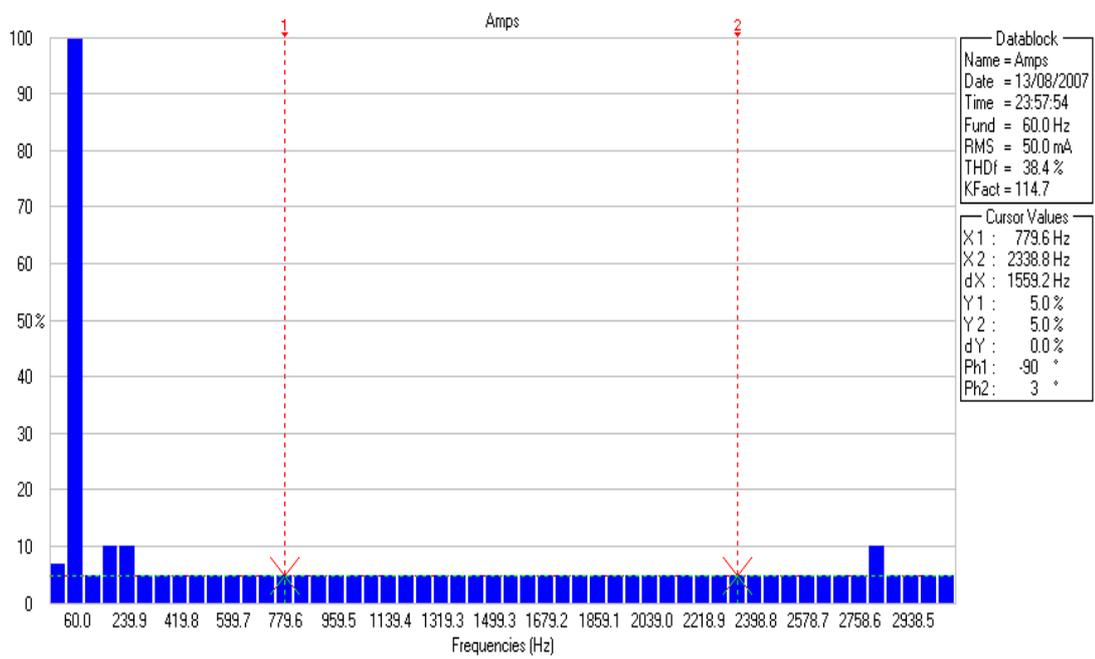
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 64. Armónicos medidos en la corriente de una fase.



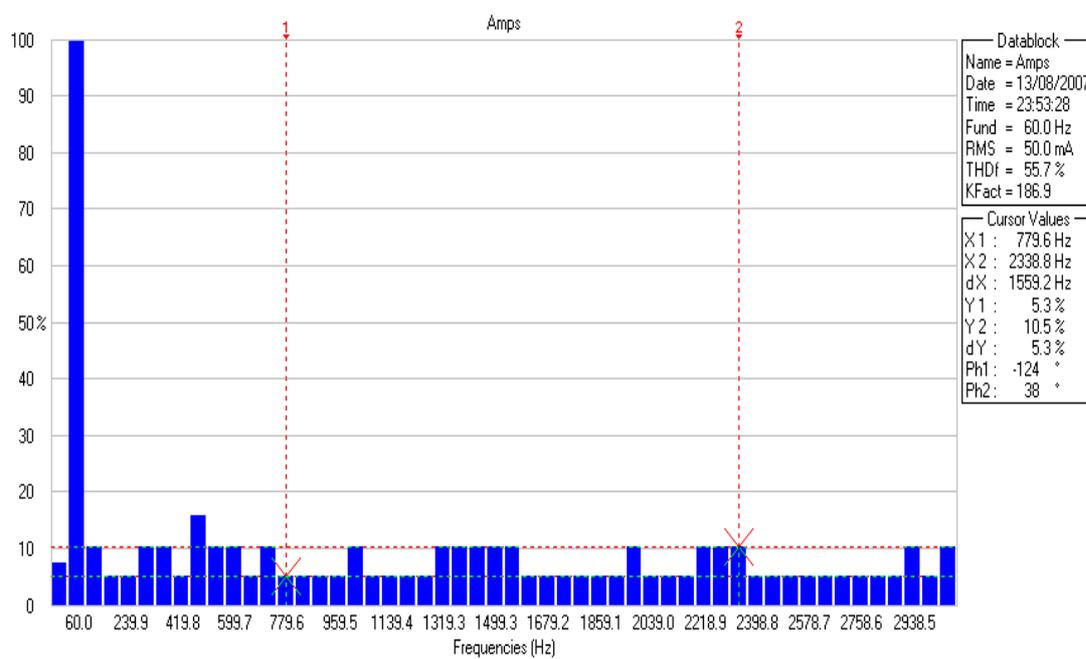
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 65. Armónicos medidos en el voltaje entre una fase y neutro



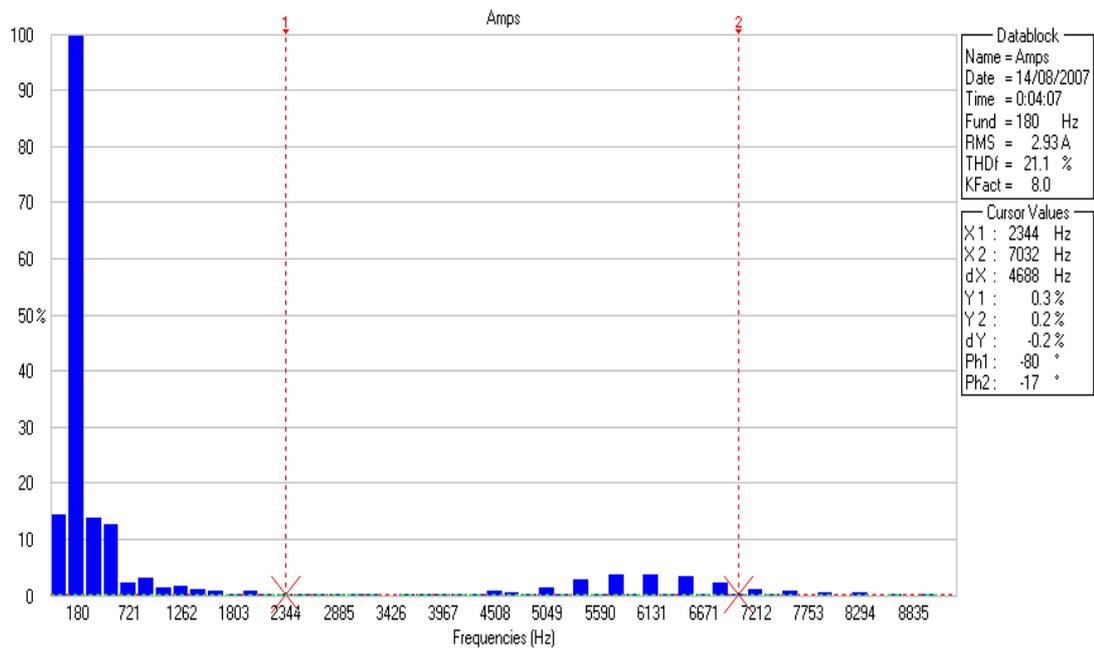
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 66. Armónicos medidos en el voltaje entre dos fases del transformador



Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

Figura 67. Armónicos medidos en el neutro



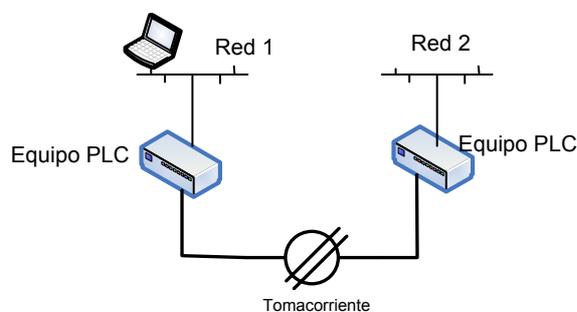
Fuente: Medición con analizador de potencia Fluke 43B

12.2 Determinación de las pérdidas por el conductor

12.2.1 Conexión en el mismo punto, sin otro tipo de carga

Como primer paso, se hará la prueba 1, donde se observara la conducta del ambiente sin tener ningún otro tipo de carga, y sin tener un conductor de intermedio. En un mismo tomacorriente se conectarán los dos equipos PLC y se procede a hacer la medición. La forma de hacer la medición es conectando la computadora con el *software Netgear Powerline Utility* en un extremo de una de las redes, y se le indica que detecte el equipo en el otro extremo (figura 68). Al ser detectado mide la tasa de transferencia de bits (denominado “rate” en el medidor) que pueden llegar al otro extremo en un segundo

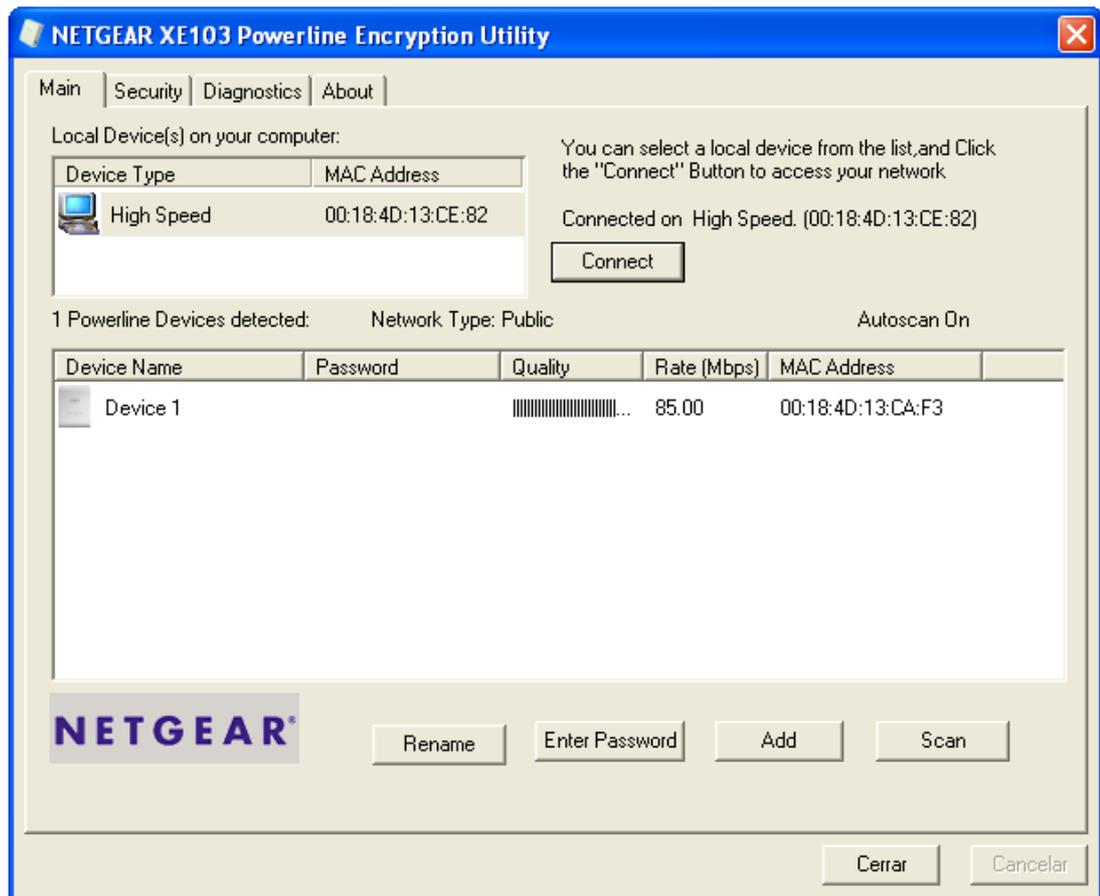
Figura 68. Conexión de los equipos en un mismo punto, sin pérdidas por carga



Fuente: Elaboración propia

En la figura 69 se puede ver la pantalla del equipo de medición, donde muestra que efectivamente están siendo transmitidos 85 Megabits por segundo, que es el 100% de velocidad de transmisión que pueden ser enviados de un extremo a otro, por lo cual no existe ninguna pérdida.

Figura 69. Conexión en el mismo punto, sin otro tipo de carga

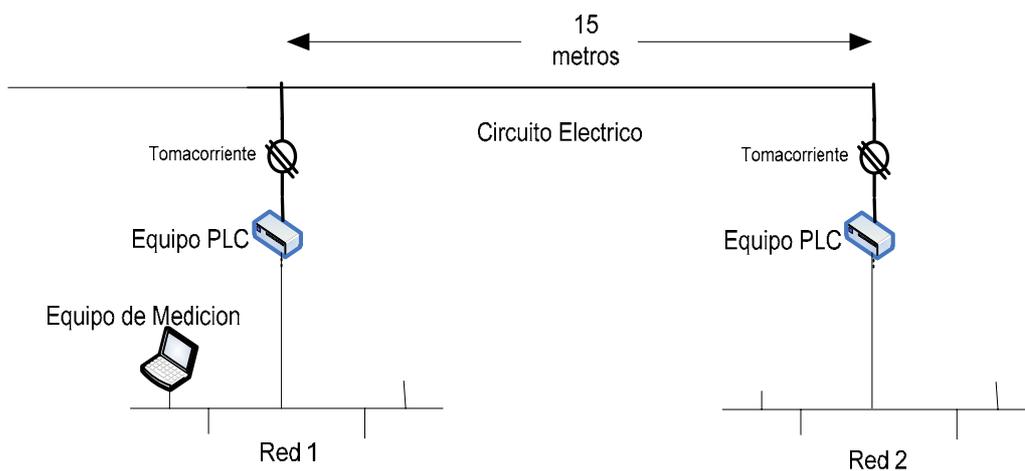


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.2.2 Conexión a 15 metros de distancia, sin otro tipo de carga

Se realizó esta prueba interponiendo entre los equipos PLC un circuito con una longitud de 15 metros, teniendo conectados únicamente los equipos PLC sin ningún otro tipo de carga. El diagrama que se siguió fue el de la figura 70.

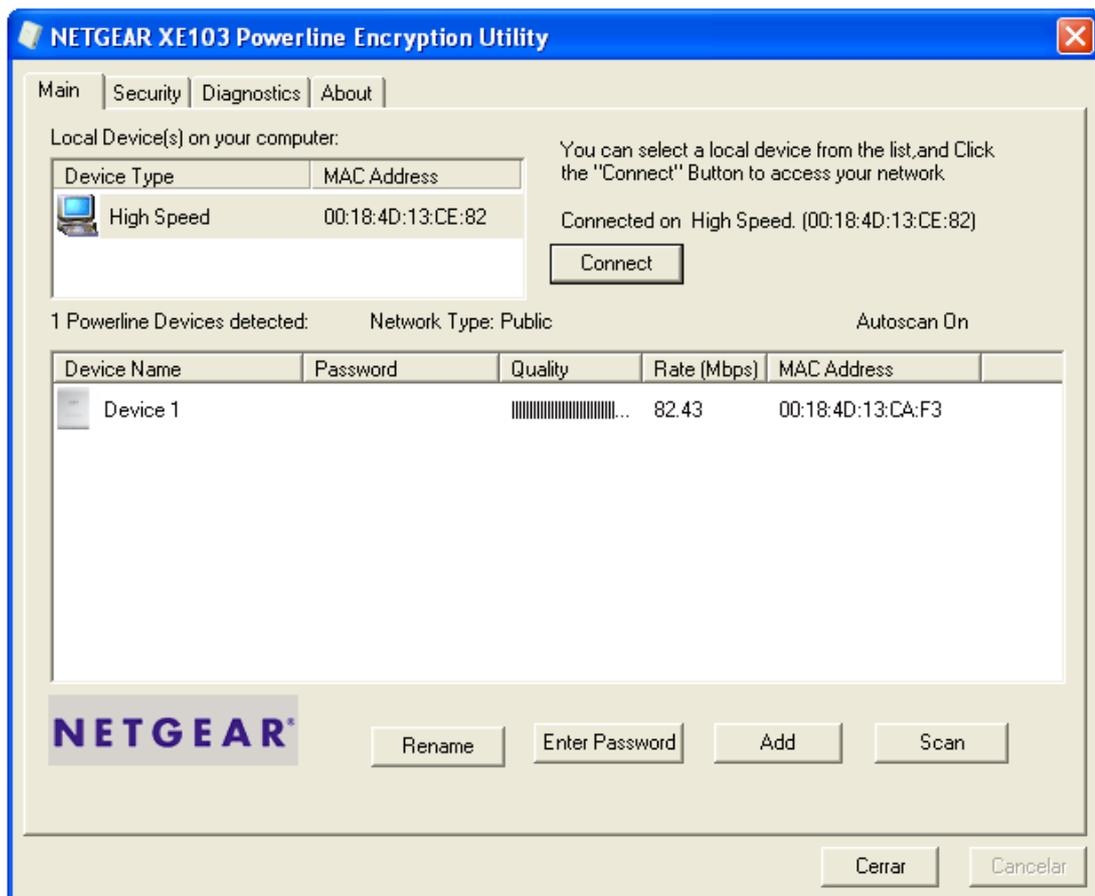
Figura 70. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 15 metros de distancia



Fuente: Elaboración propia

En la figura 71 se muestra la pantalla del medidor donde indica que entre los dos puntos hay una tasa de transferencia de 82.43 bits. No se llega a los 85 debido a las pérdidas en la línea, sin embargo las pérdidas son mínimas, ya que el circuito no tiene carga. Las pérdidas son debido a la inductancia de los conductores.

Figura 71. Conexión a 15 metros de distancia, sin otro tipo de carga

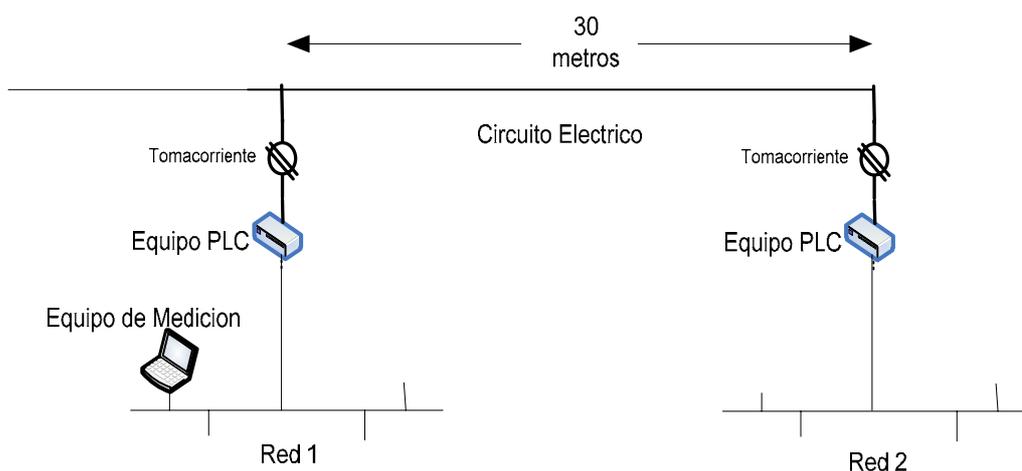


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utiliy

12.2.3 Conexión a 30 metros de distancia, sin otro tipo de carga

Se realizó esta prueba interponiendo entre los equipos PLC un circuito con una longitud de 30 metros, teniendo conectados únicamente los equipos PLC sin ningún otro tipo de carga. El diagrama que se siguió fue el de la figura 72.

Figura 72. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 30 metros de distancia.



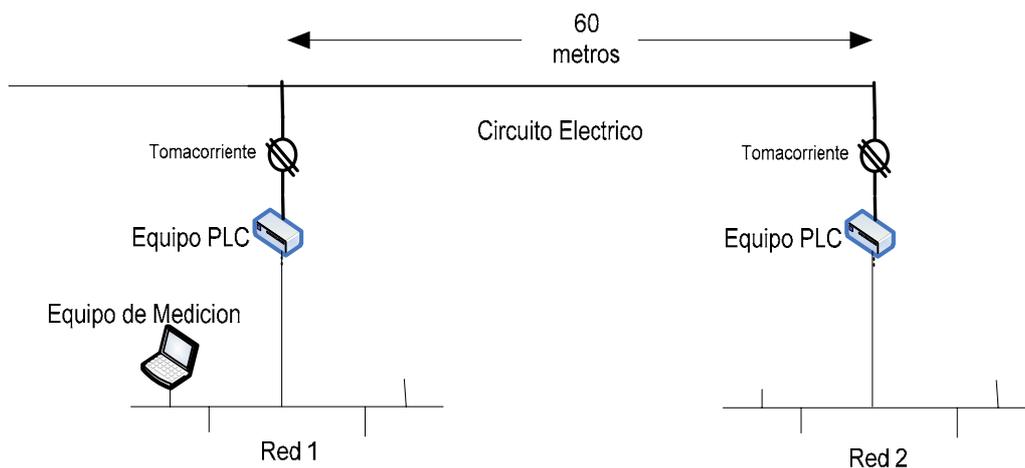
Fuente: Elaboración propia

En la figura 73 se muestra la pantalla del medidor donde indica que entre los dos puntos hay una tasa de transferencia de 80.6. No se llega a los 85 debido a las pérdidas en la línea, sin embargo las pérdidas son mínimas, ya que el circuito no tiene carga. Las pérdidas son debidas mayormente a la inductancia y a esta distancia ya debe de considerarse la capacitancia de la línea.

12.2.4 Conexión a 60 metros de distancia, sin otro tipo de carga

Se realizó esta prueba interponiendo entre los equipos PLC un circuito con una longitud de 60 metros, teniendo conectados únicamente los equipos PLC sin ningún otro tipo de carga. El diagrama que se siguió fue el de la figura 74.

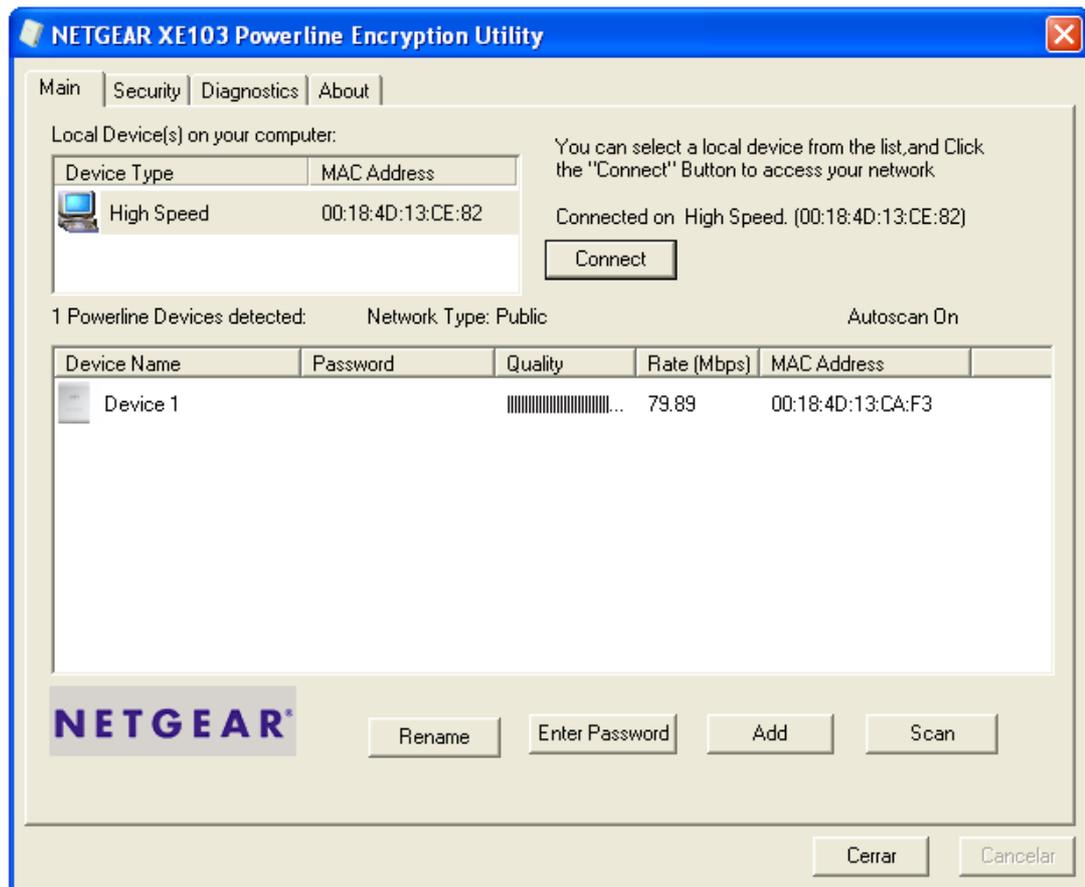
Figura 74. Conexión de los equipos PLC en un circuito separados 60 metros de distancia



Fuente: Elaboración propia

En la figura 75 se muestra la pantalla del medidor donde indica que entre los dos puntos hay una tasa de transferencia de 79.89. No se llega a los 85 debido a las pérdidas en la línea, sin embargo las pérdidas son mínimas, ya que el circuito no tiene carga.

Figura 75. Conexión a 60 metros de distancia, sin otro tipo de carga



Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.3 Determinación de los problemas y pérdidas generados por las diversas cargas en los circuitos

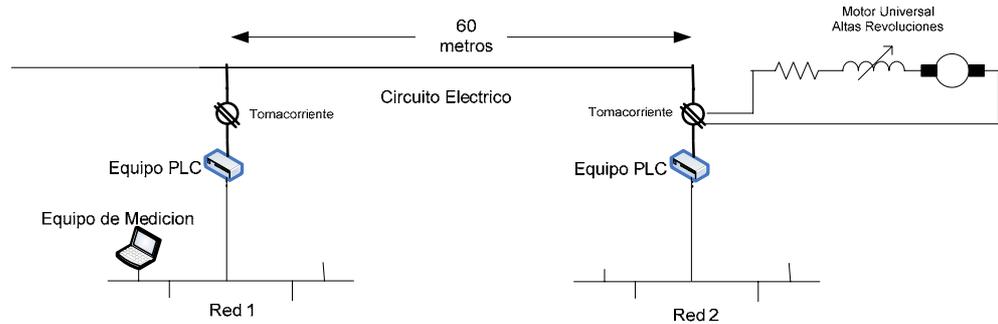
Al realizar las pruebas en circuitos sin carga, vimos que el sistema se comporta de forma adecuada, y las pérdidas por el conductor se pueden considerar que no afectan de forma significativa a los servicios de comunicaciones en distancias cortas y medianas. Ahora, se dejara el equipo conectado en el circuito de 60 metros y se conectaran a este diversos tipos de carga para ver la conducta de los servicios de comunicaciones, al compartir el mismo medio con las demás servicios.

12.3.1 Conexión en un circuito con un motor universal

Al circuito de 60 metros, se conecto un barreno de altas revoluciones, el cual consume 4.58 amperios. Un dispositivo de estos, por tener motor universal, usa carbones para conectarse al colector del inducido, lo cual hace que genere una cantidad grande de distorsiones en el circuito eléctrico. Genera una corriente no lineal, desfasada con el voltaje, genera transitorios al arranque y al detenerse y armónicos. Adicionalmente, las revoluciones no son constantes, dependiendo de la carga del mismo.

En la figura 76 se muestra el diagrama de la conexión del circuito. Se enviará la señal de comunicaciones y al mismo tiempo se conectará el motor universal en el mismo circuito.

Figura 76. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con un motor universal

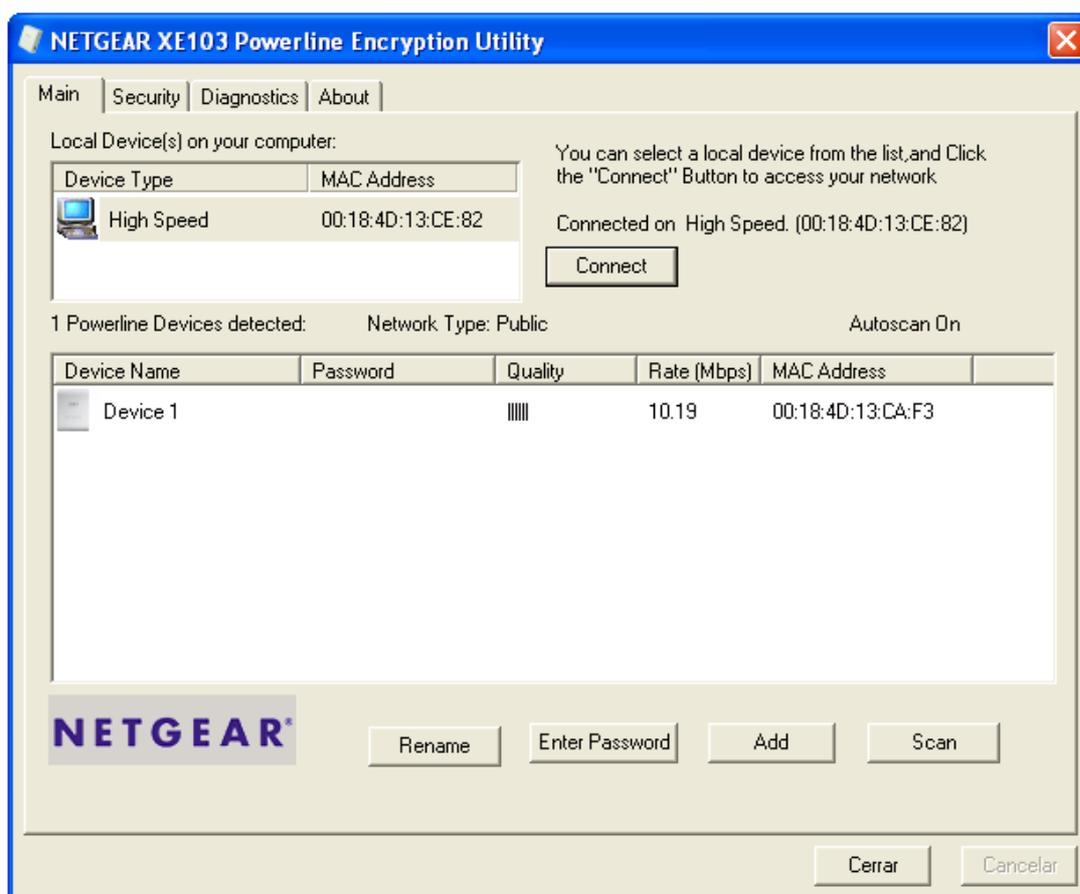


Fuente: Elaboración propia

En la figura 77 se puede observar lo que despliega el medidor. La señal de comunicaciones baja abruptamente a 10.19 Megabits por segundo. Esto se debe a que la carga del motor genera demasiado ruido para lo que afecta el ancho de banda digital de la transmisión.

Esta prueba demuestra que los distintos dispositivos que producen ruido eléctrico, conectados en un sistema eléctrico afectan considerablemente cualquier sistema de comunicación que se quiera transmitir por los mismos conductores, y que la calidad y eficiencia de estos dependen grandemente de las cargas que ahí se encuentren conectadas y sobre todo de cómo se encuentren conectadas, por lo cual no solo la pérdida en las líneas debe de ser considerada a la hora de intentar hacer un diseño de transmitir servicios de comunicaciones por el sistema eléctrico.

Figura 77. Conexión en un circuito con carga inductiva

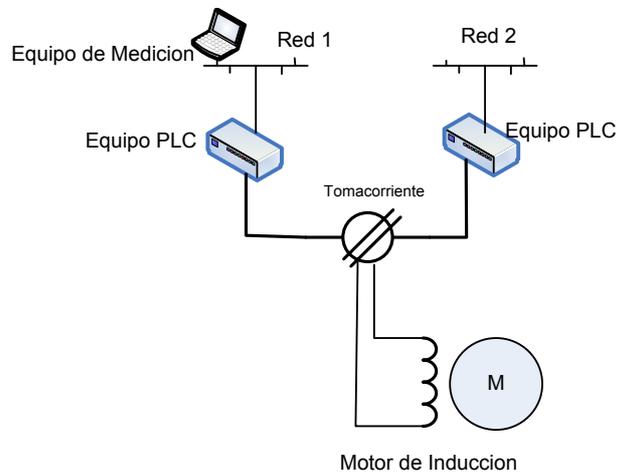


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.3.2 Conexión en un circuito con un motor de inducción

Se conectó en el mismo circuito donde estaban los equipos PLC un motor de inducción de ½ HP monofásico, según el diagrama de la figura 78.

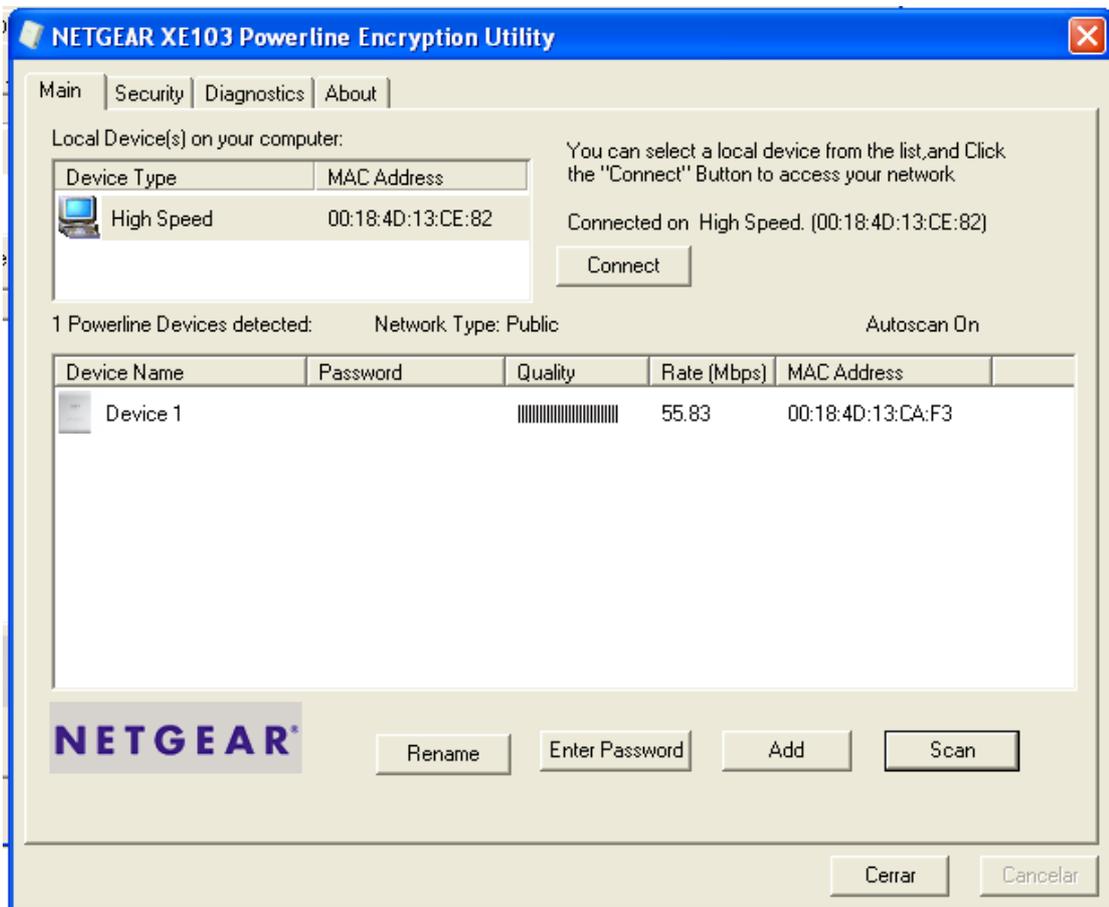
Figura 78. Conexión de equipos PLC en conjunto con un motor de inducción monofásico.



Fuente: Elaboración propia

Durante el régimen permanente, la tasa de transferencia se mantuvo prácticamente invariable, según la medición de la figura 79, midiendo 84.66 Megabits de transferencia. Sin embargo en el arranque del motor la tasa de transferencia no fue constante, bajando considerablemente un lapso corto y estabilizándose al llegar el motor al régimen permanente (medición de la figura 80). Esto se debió a los transitorios del arranque, el arco del interruptor centrífugo y el capacitor que este tiene conectado. Al quedar funcionando el motor en régimen permanente, la señal de comunicaciones se transmitió sin ningún problema.

Figura 80. Bits transmitidos durante el arranque del motor de inducción

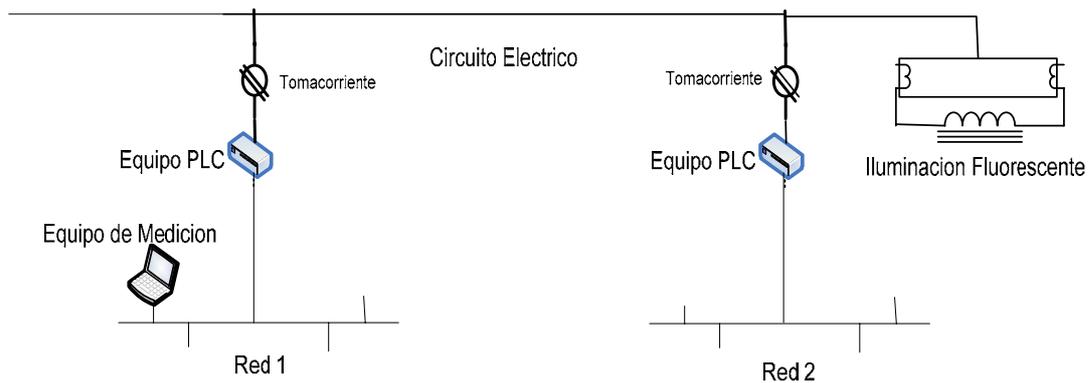


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.3.3 Conexión en un circuito de iluminación fluorescente

Se transmitió señal por un circuito, el cual estaba compartido por un sistema de iluminación fluorescente. El diagrama que se siguió es el de la figura 81.

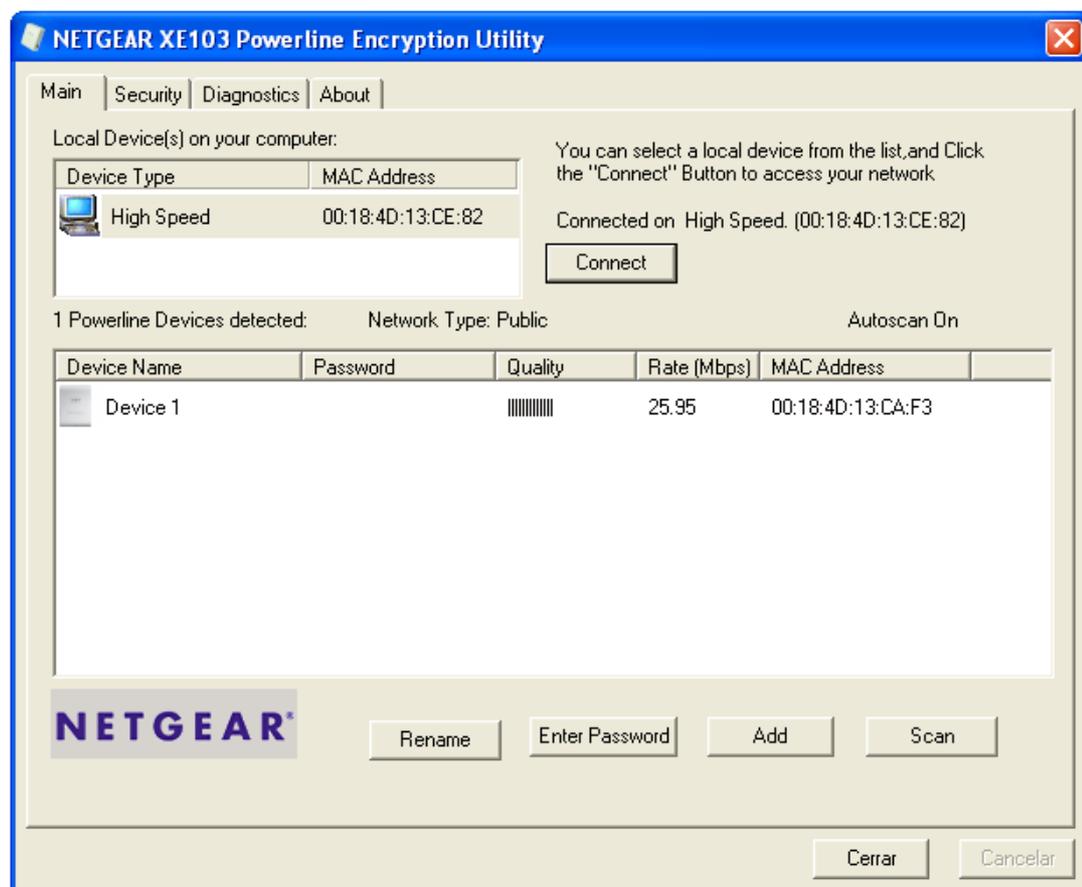
Figura 81. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con un sistema de iluminación fluorescente



Fuente: Elaboración propia

En la figura 82 se puede apreciar que el resultado es que la velocidad de transmisión baja a 25.95 Megabits por segundo, debido a las interferencias generadas por el sistema de iluminación, las cuales se pueden considerar como altas, ya que baja su rendimiento considerablemente.

Figura 82. Conexión en un circuito de iluminación fluorescente

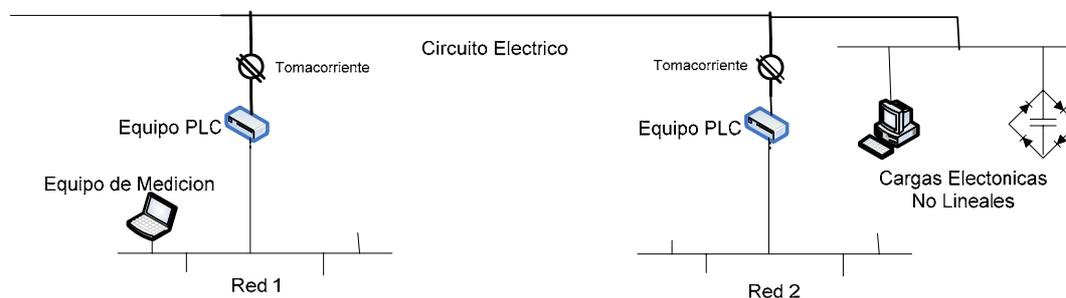


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.3.4 Conexión en circuitos con cargas no lineales

Se hizo el análisis transportando la señal de comunicaciones por un circuito con cargas no lineales varias (aparatos electrónicos y computadoras, como el que se muestra en la figura 83). El servicio también se vio afectado en su velocidad. Los circuitos con cargas electrónicas que poseen rectificadores que entregan al sistema de energía picos de voltaje y una corriente distorsionada, así como armónicos. La cantidad de degradación depende de la cantidad de equipos que estén en el circuito.

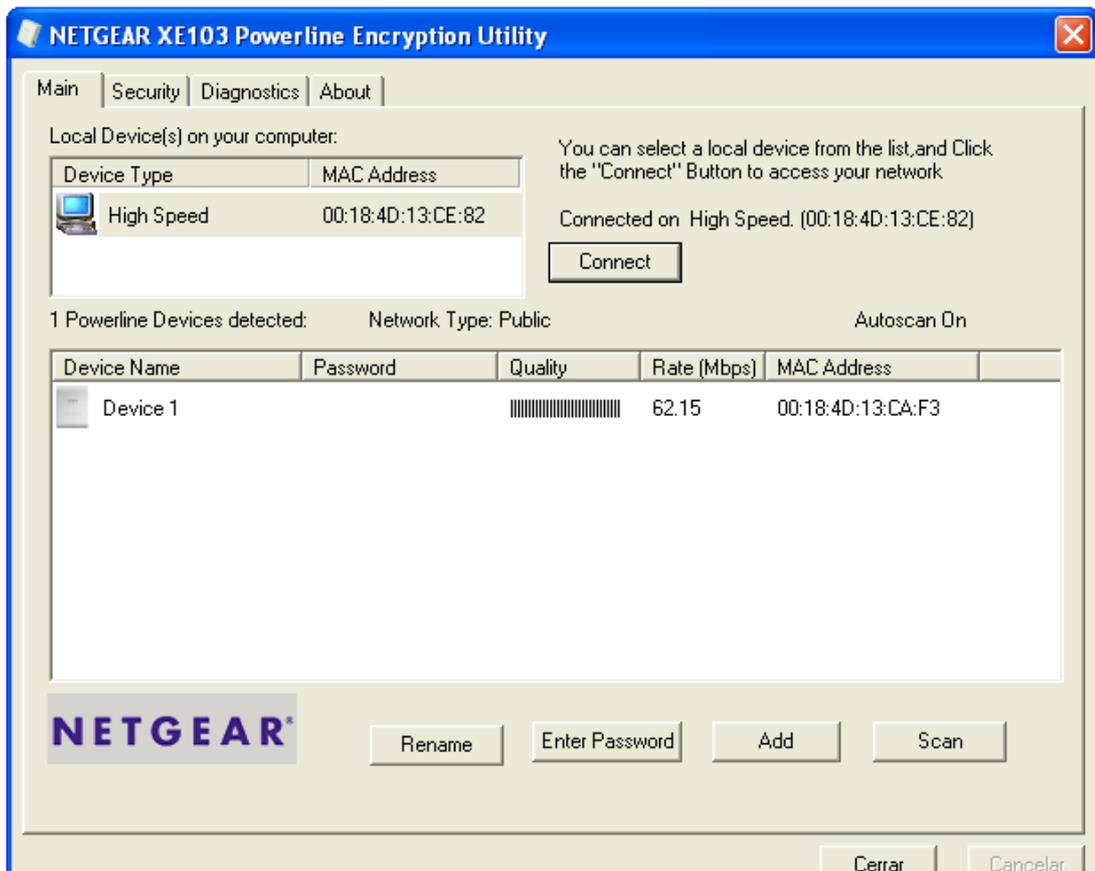
Figura 83. Conexión de los equipos PLC en un circuito compartido con cargas no lineales



Fuente: Elaboración propia

Al conectar los equipos en un circuito con cargas no lineales (equipos electrónicos y computadoras), la señal de transmisión bajo hasta 62.15 Megabits por segundo, como se ve en la medición de la figura 84.

Figura 84. Conexión en circuitos con cargas no lineales



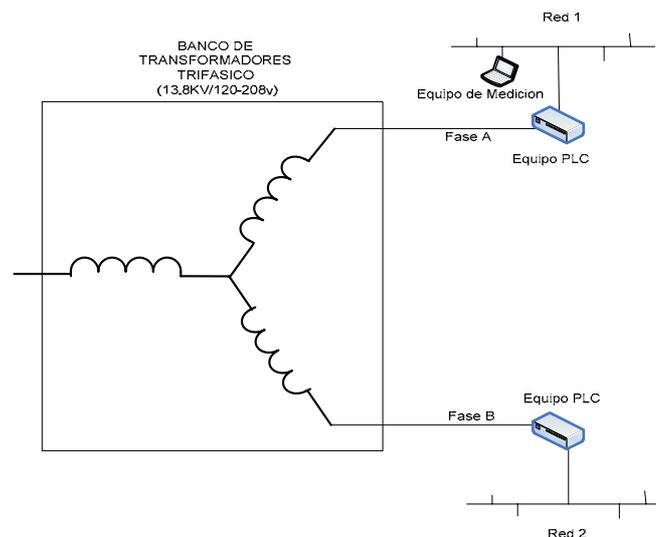
Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.4 Determinación de los problemas y pérdidas al conectar los equipos en circuitos en diferentes líneas y fases

12.4.1 Conexión entre diferentes fases sin otro tipo de carga (circuitos trifásicos)

Se conectaron los equipos PLC a la salida del transformador, uno en cada fase, por lo que para poder llegar la comunicación de uno a otro equipo debieron de atravesar el devanado secundario del transformador, sufriendo un desfase de 120 grados, y conviviendo con todo tipo de ondas, armónicas y distorsiones que suceden en el transformador. El diagrama seguido fue el de la figura 85.

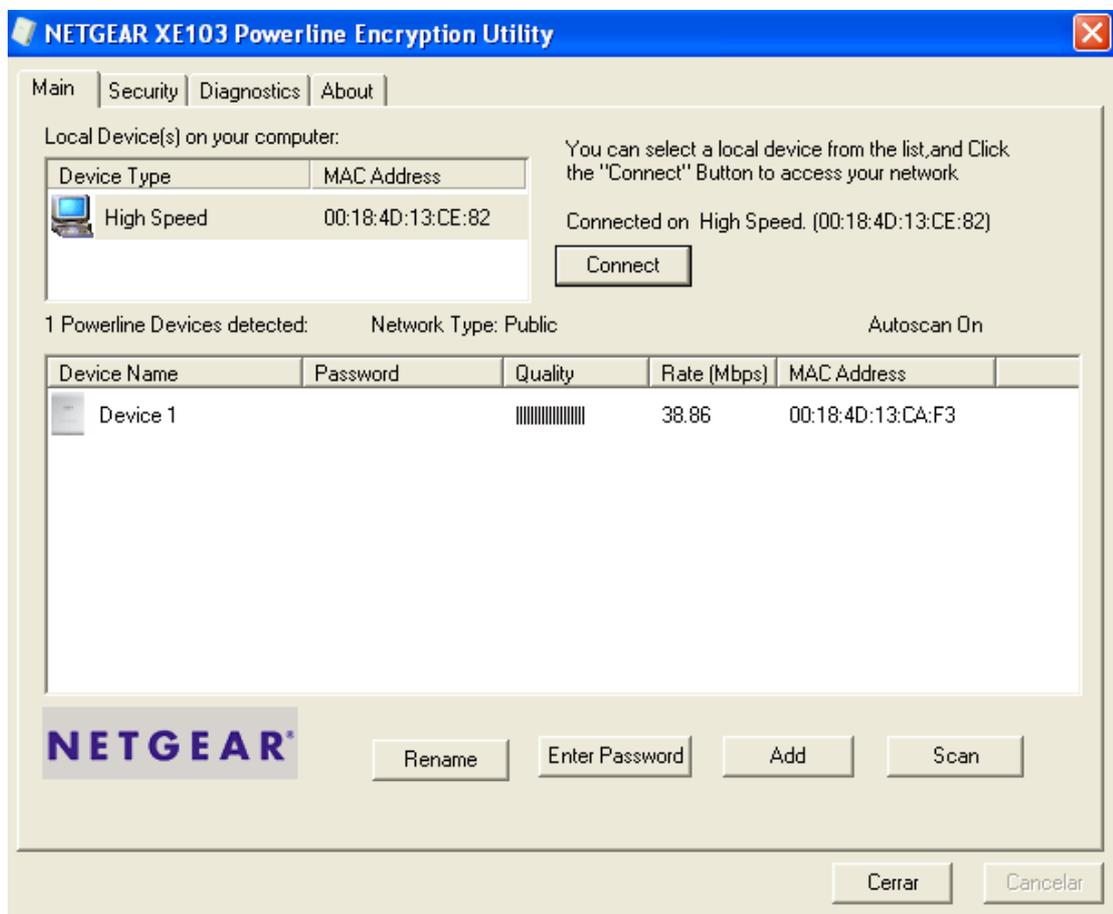
Figura 85. Conexión de los equipos PLC a la salida de un banco de transformadores, entre dos fases.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 86 se puede ver la medición, la cual indica que la velocidad de transmisión bajo a 38.86 Megabits, únicamente por cambiar de fase, sin tener conductores ni otras equipos conectados.

Figura 86. Conexión entre diferentes fases sin otro tipo de carga

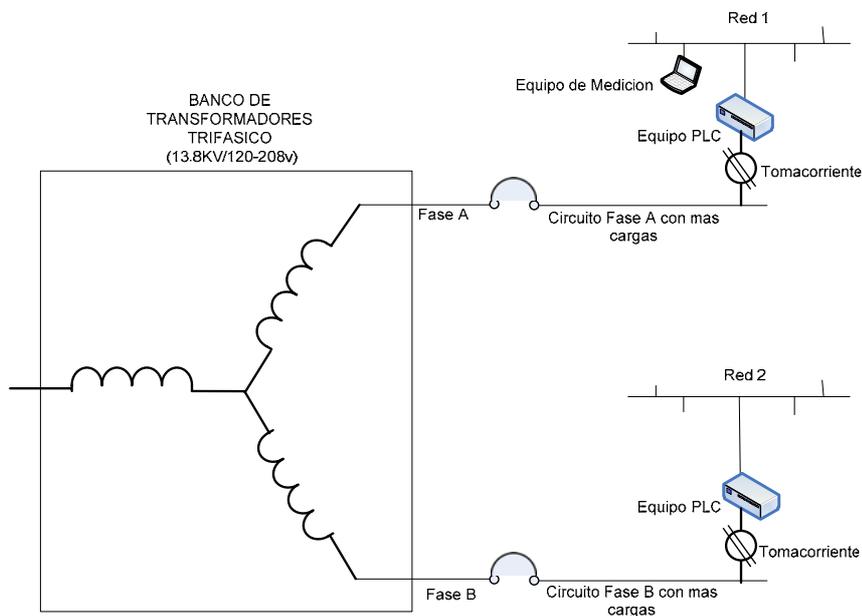


Fuente: Medición con software Netgear Powerline

12.4.2 Conexión entre diferentes fases con diferentes cargas (circuitos trifásicos)

Se realizó la conexión de los equipos en los diferentes circuitos del edificio, de dos fases diferentes, transmitiendo la señal con la demás carga existente, además de tener los conductores del circuito. El diagrama a seguir fue el de la figura 87.

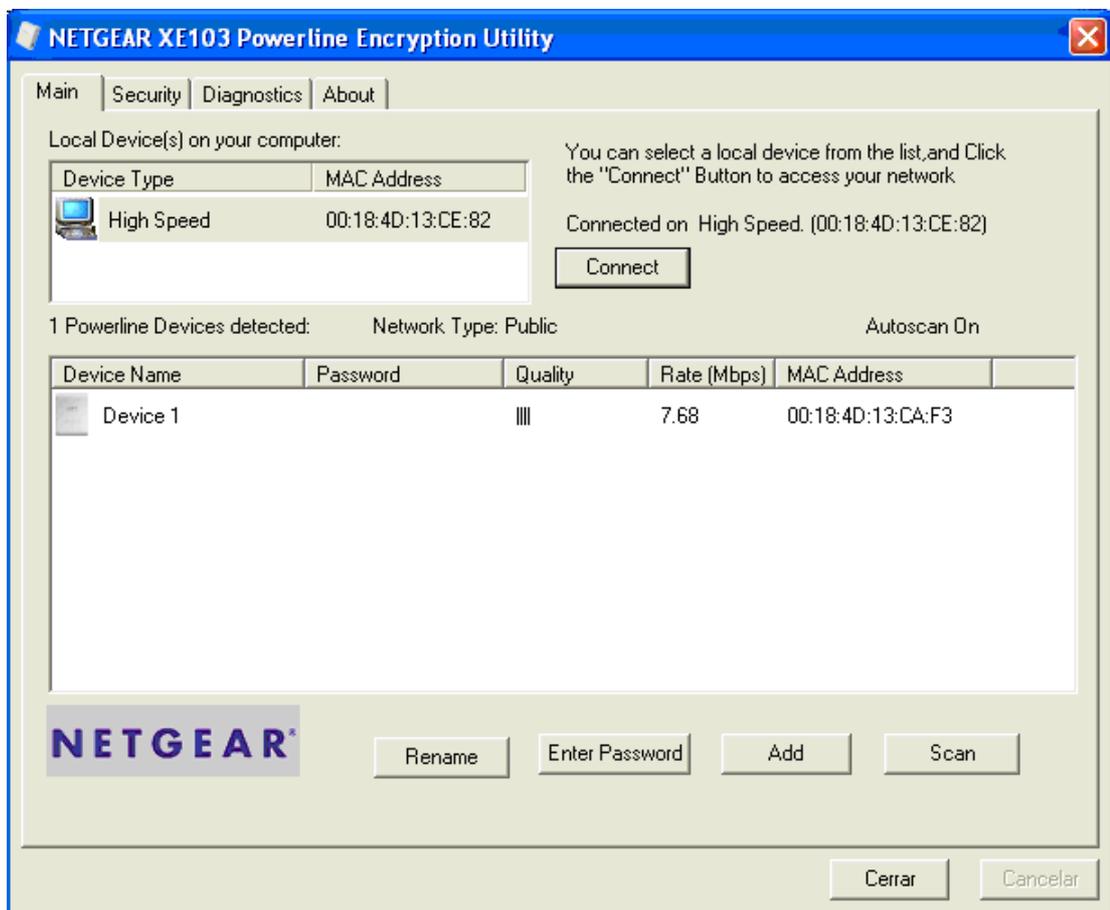
Figura 87. Conexión de los equipos PLC en dos circuitos con más cargas, conectados a fases diferentes del transformador



Fuente: Elaboración propia

El equipo de medición reflejo lo que aparece en la figura 88. La velocidad de transmisión bajo a 7.68 Megabits por segundo, teniendo una degradación considerable con respecto a los ejemplos anteriores.

Figura 88. Conexión entre diferentes fases con diferentes cargas (circuitos trifásicos)



Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

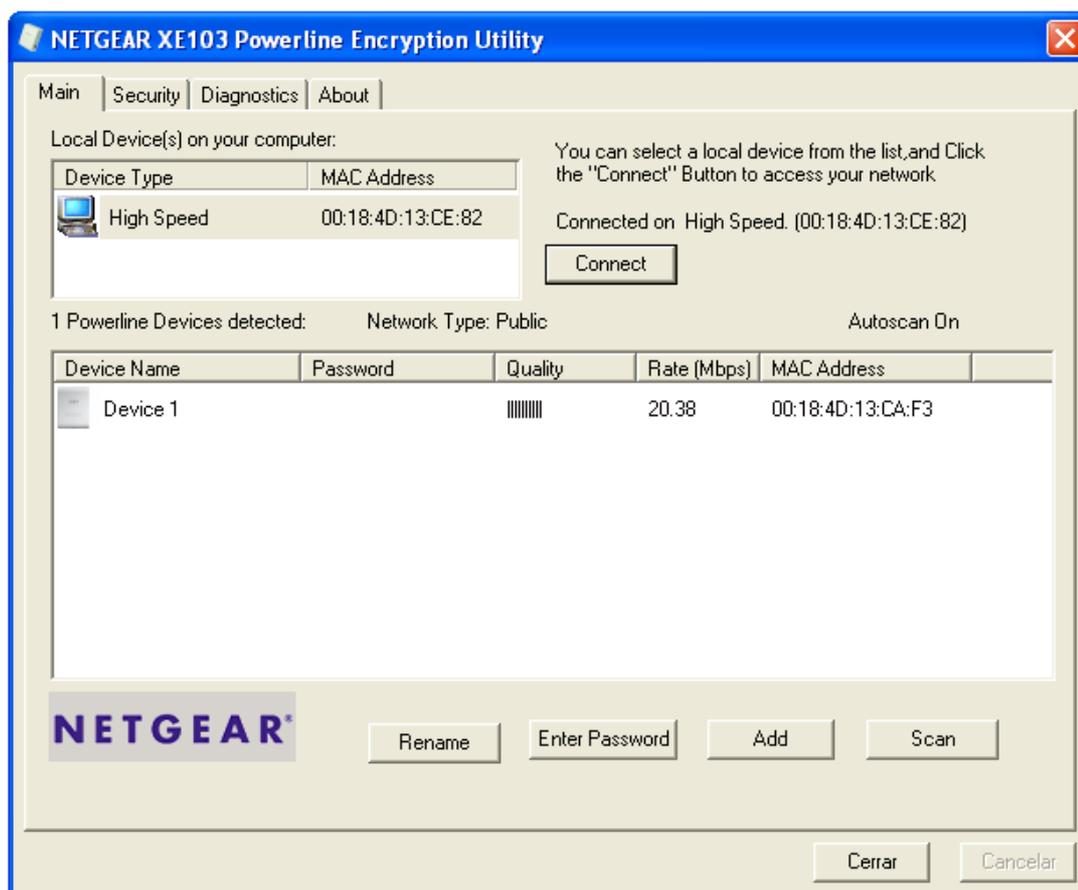
12.5 Determinación de los problemas y pérdidas ocasionados al transmitir señales por las líneas de distribución

Al enviar las señales entre diferentes acometidas eléctricas, se transmite por medio de los cables de distribución eléctrica de la empresa distribuidora de energía, los cuales se encuentran generalmente a la intemperie, teniendo todo tipo de carga y en ocasiones estando sobrecargados, y adicionalmente estando expuestos a cualquier tipo de falla. Estas pruebas se hicieron en una manzana de residencias, las cuales tienen servicio eléctrico del mismo banco de transformadores.

12.5.1 Conexión exterior entre dos acometidas diferentes

Se realizó la conexión de los equipos PLC entre dos residencias contiguas con acometidas diferentes, y el resultado fue que la velocidad de transmisión bajo a 20.38 Megabits, como lo muestra la figura 89.

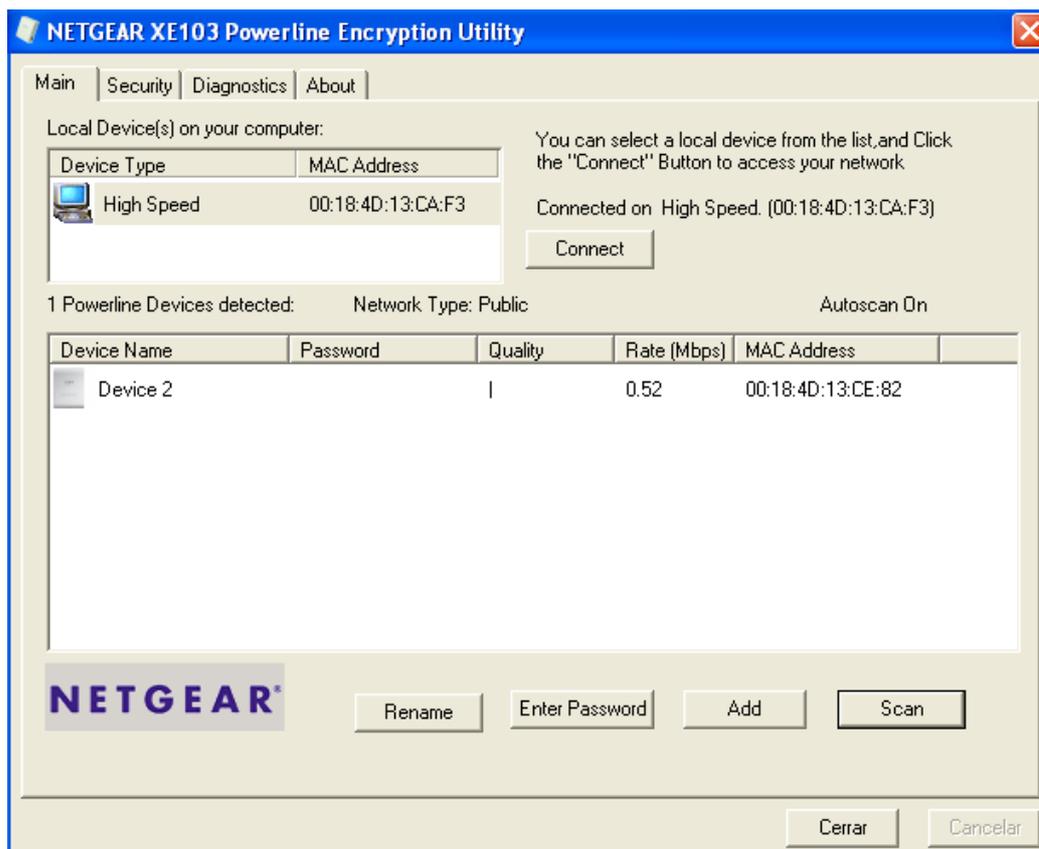
Figura 89. Conexión exterior entre dos acometidas diferentes



Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

Se realizó la conexión de los equipos PLC entre dos residencias ubicadas en la misma manzana, alimentadas por el mismo banco de transformadores, estando separadas aproximadamente 175 metros. La señal de comunicaciones viaja a través del tendido eléctrico exterior llegando de una casa a otra, a una velocidad de 0.53 Megabits por segundo, como lo muestra la figura 90.

Figura 90. Conexión exterior entre servicios conectados al mismo banco de transformadores, pasando por los cables externos del servicio de energía eléctrica.

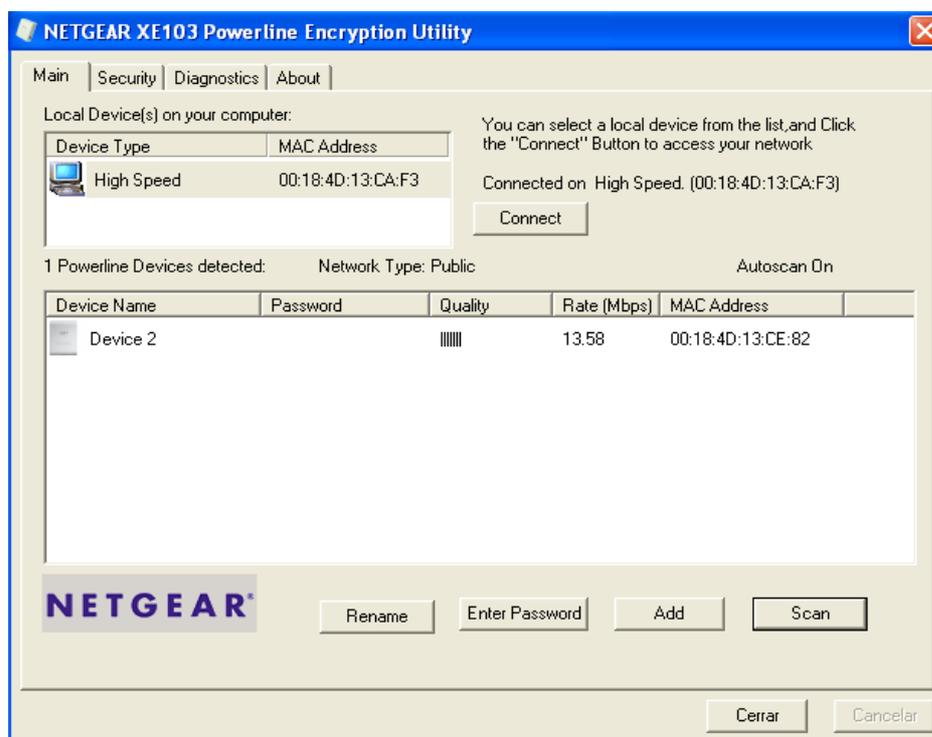


Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

12.6 Efectos en los servicios transmitidos

Para ver los efectos causados a las transmisiones de datos y telefonía, se armó un ambiente de pruebas teniendo dos equipos PLC en un circuito con conductores de 60 metros de longitud. La medición en este ambiente es fue de una transmisión de 79.89 Megabits por segundo (figuras 74 y 75). Luego se conecto al sistema eléctrico, y se conecto un equipo PLC en un tomacorriente escogido al azar, y se conectaron todo tipo de cargas al circuito para causar una degradación considerable. El resultado de la medición de transmisión de datos fue el mostrado en la figura 91.

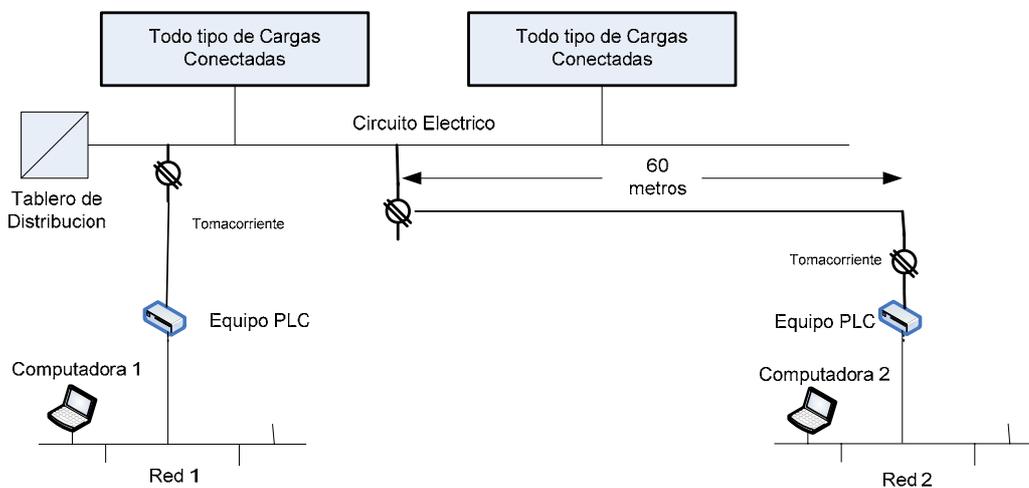
Figura 91. Medición de la transferencia de bits para el diagrama de las figuras 92 y 93.



Fuente: Medición con software Netgear Powerline Utility

Como se observa, el ancho de banda baja considerablemente (a 13.58 Megabits). Para ver el efecto sobre la transmisión de datos se conectaron dos computadoras en los equipos PLC. Se transmitió un archivo de 20 Megabits en el primer ambiente (sin carga) y demoro aproximadamente dos minutos y medio en ser trasladado. Luego se conectaron las cargas, según el diagrama de la figura 92, y el tiempo de transmisión del mismo archivo demoro ahora aproximadamente 11 minutos. La transmisión de la señal se ve seriamente degradada debido a la disminución del ancho de bando por el ruido producido por los equipos, ya que los datos necesitan alto ancho de banda para ser transmitidos con rapidez.

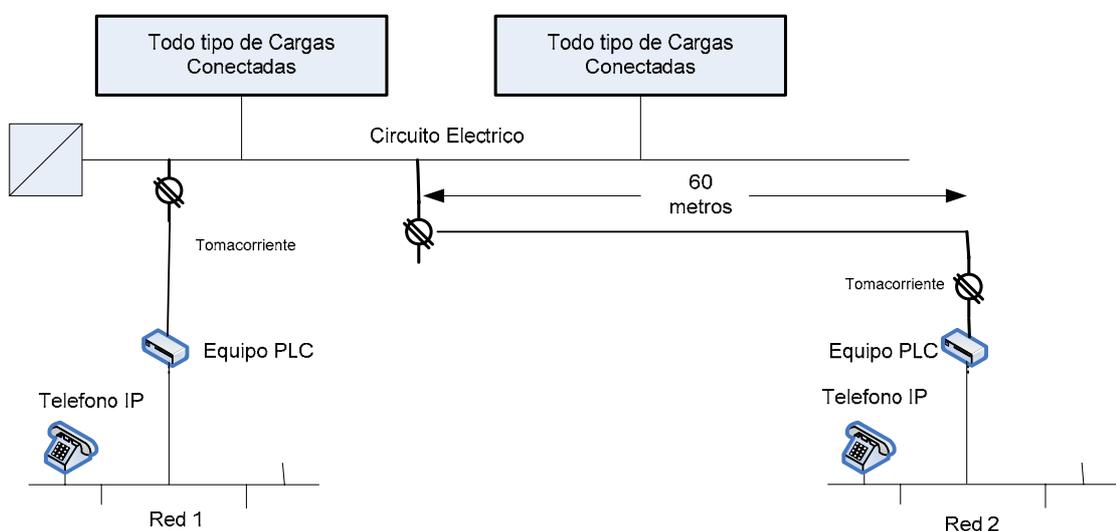
Figura 92. Transmisión de datos por un sistema eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

Para ver como afecta la telefonía, se hizo la prueba en el mismo ambiente, solo que se colocaron ahora dos teléfonos IP, como lo muestra la figura 93. Se efectuó una llamada sin los equipos conectados y esta se escucho de forma clara, sin ningún tipo de ruido o pérdida en la calidad de la voz. Se conectaron los equipos, bajando el ancho de banda a 13.58 Megabits, y se efectuó la llamada y la misma se escucho con la misma calidad que la primera. Esto se debió a que la llamada únicamente necesito 24 Kilobits de ancho de banda (según la codificación utilizada puede requerir hasta 64 Kilobits en *Ethernet*) para funcionar de forma adecuada, y el ambiente PLC proporcionó mucho más que este valor.

Figura 93. Transmisión de telefonía por un sistema eléctrico



Fuente: Elaboración propia

12.7 Identificación de recursos

Los recursos que se necesitan para hacer el análisis del presente trabajo son los siguientes:

- 1 Analizador de potencia con osciloscopio
- 6 Equipos PLC para conexión de Interiores
- 2 Equipos de conexión de red (*Switches*)
- 2 Teléfonos con interfase *Ethernet* para telefonía por red
- 1 Herramienta de medición de transmisión de paquetes (*software*)
- 2 Computadoras portátiles para medición y pruebas

Adicionalmente, las pruebas deben de hacerse dentro del siguiente ambiente, que son los lugares donde se puede prestar el servicio:

- Instalaciones interiores monofásicas
- Instalaciones comerciales e industriales trifásicas
- Banco de transformadores trifásico 13.8KV/208-120V
- Ultima milla acometidas eléctricas
- Tener todo tipo de equipos eléctricos para poder hacer las pruebas

CONCLUSIONES

1. Los principales problemas que producen los diferentes equipos activos y pasivos de un sistema eléctrico a las señales de comunicaciones que se transmiten por el mismo medio son la atenuación de la señal debido a que las cargas conectadas en los circuitos alteran la impedancia que existen entre los equipos de comunicaciones, sobre todo si los equipos están conectados en diferentes fases de un banco de transformadores, y la degradación de los servicios de comunicaciones transmitidos debido a la disminución del ancho de banda de las señales, las cuales se ven afectadas por el ruido eléctrico, que en este caso es cualquier otro tipo de onda que transite por el sistema.
2. Los parámetros que deben ser medidos del sistema eléctrico para poder determinar la conducta de los servicios de comunicaciones que serán implementados, son las inductancias y capacitancias tanto de los conductores, de las cargas y de los devanados secundarios de los transformadores de potencia si es que los equipos de comunicaciones están conectados en diferentes fases, así como toda señal que sea considerada como ruido eléctrico, las cuales son armónicos, transitorios, inducciones externas o distorsiones en voltajes y corrientes. Si los equipos están conectados en diferentes fases de voltaje, también debe de tomarse en cuenta la temperatura de los transformadores, ya que se produce ruido térmico.
3. La transmisión de datos es el servicio que más se ve afectado al ser transmitido por un sistema eléctrico, debido a que demanda un ancho de

banda digital grande para su eficiente funcionamiento, y este se ve disminuido debido al ruido eléctrico, por lo que su uso en ambientes PLC debe de ser moderado. La transmisión de servicios de telefonía IP, no demanda anchos de banda grandes y su funcionamiento no es continuo (se utiliza solo en el momento de hacer llamadas), por lo que la tecnología PLC funciona muy bien para este tipo de servicios, ya que el ancho de banda que se mantiene al interactuar con el ruido eléctrico es suficiente para que funcionen de forma adecuada.

4. Los niveles de ruido que existen en el sistema eléctrico donde se implementará el ambiente PLC son la principal circunstancia que permitirá que los servicios de comunicaciones funcionen o no de forma eficiente, por lo que se debe de hacer un análisis de cargas y equipos conectados y conocer cuales son los que producen más ruido eléctrico (tales como equipos electrónicos, iluminación fluorescente y equipos que produzcan arcos eléctricos), ya que en circuitos que tengan conectados demasiados equipos de estos, se pueden presentar los problemas de degradación de ancho de banda. Las cargas que casi no producen ruido eléctrico que afecte a las señales de comunicaciones son las resistivas o los motores de inducción, por lo que circuitos que tengan este tipo de cargas pueden ser utilizados sin ningún problema.

RECOMENDACIONES

1. Antes de implementar una red utilizando la tecnología PLC, hacer un análisis de la instalación eléctrica, para verificar que se cumplan las normas de instalación y calidad de energía, diagramas de circuitos y cargas conectadas, para hacer el diseño más óptimo del sistema. Utilizar siempre los circuitos menos cargados.
2. Evitar utilizar los circuitos con sistemas de iluminación fluorescente en cualquier tipo de instalación, ya que los balastos magnéticos y electrónicos producen distorsión armónica considerable.
3. Evitar en lo que sea posible conectar los equipos PLC en los mismos circuitos donde hay dispositivos electrónicos, sobre todo si tienen fuente de potencia conmutada. En centros de computo es recomendable utilizar transformadores de aislamiento para evitar que se propaguen los armónicos y distorsiones producidas por estos equipos en el resto del sistema eléctrico.
4. Al conectar los equipos PLC, utilizar en la medida de lo posible, la misma línea de voltaje. Esto evitará que las señales atraviesen fases de los transformadores. Si no es posible conectar los equipos en las líneas de la misma fase, pueden conectarse en diferentes, pero el servicio no será de la misma calidad.

5. Utilizar la tecnología PLC para un solo tipo de servicio. No mezclar servicios como la transmisión de datos y la telefonía. Esto puede ocasionar resultados no deseados.
6. Para evitar hacer infraestructuras de redes LAN, puede utilizarse la tecnología PLC para la transmisión de telefonía IP y la tecnología inalámbrica para la transmisión de datos. El resultado es una red híbrida eficiente a bajo costo.
7. La tecnología PLC puede utilizarse en industrias para dar servicios a usuarios ubicados en las plantas de operación, donde los accesos con los medios tradicionales a veces son difíciles debido a la distancia, la canalización y las interferencias, ya que los problemas que le ocasionan los motores eléctricos de inducción no son de mayor incidencia, siempre y cuando los sistemas eléctricos cumplan con sus respectivas normas de instalación.
8. La tecnología PLC puede utilizarse como medio de conexión redundante para redes. Muchos edificios, comercios e industrias que utilizan fibras ópticas o cables UTP, generalmente no tienen redundancias debido al alto costo de la implementación de las mismas, quedando fuera de servicio si hay una falla. PLC puede satisfacer esta necesidad, aunque con un menor ancho de banda, pero con un costo muy bajo.
9. La falta de recurso económico y el ahorro de costos es el principal aliciente para la implementación de PLC. Si se tiene suficiente presupuesto, se recomienda analizar las opciones tradicionales más eficientes, las cuales no se ven afectadas por los equipos de potencia.

10. Antes de hacer cualquier diseño, hacer pruebas de funcionamiento y cálculos de los anchos de banda que se pueden alcanzar en base a las posibles ubicaciones de conexión y los dispositivos conectados en los circuitos. Si las pruebas son satisfactorias, proceder con la implementación. Si los resultados de los análisis y pruebas previas no son satisfactorios, no implementar la tecnología PLC, y optar por otra solución. Cada ambiente es único.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hrasnica, Halid. **Broadband Powerline Communications. Network Design.** Inglaterra: Editorial Wiley, 2004.
2. Dostert, Klaus. **Power Line Communications.** Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall, 2001.
3. Hutton, Keith. **Designing Cisco Network Architectures.** Estados Unidos: Editorial Cisco Press, 2004.
4. Padjen, Robert. **Building Cisco Remote Access Networks.** Estados Unidos: Editorial Sybex, 2004.
5. Hayt, William. **Teoría Electromagnética**, 2da. Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1997.
6. Stevenson, William. **Análisis de Sistemas eléctricos de Potencia**, 2da. Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1988.
7. Van Valkenburg, M.E. **Análisis de Redes**, 5ta. Edición. México: 1989.
8. Poularikas Alexander. **Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing**, 1ra. Edición. Estados Unidos: Editorial CRC Press, 1999.

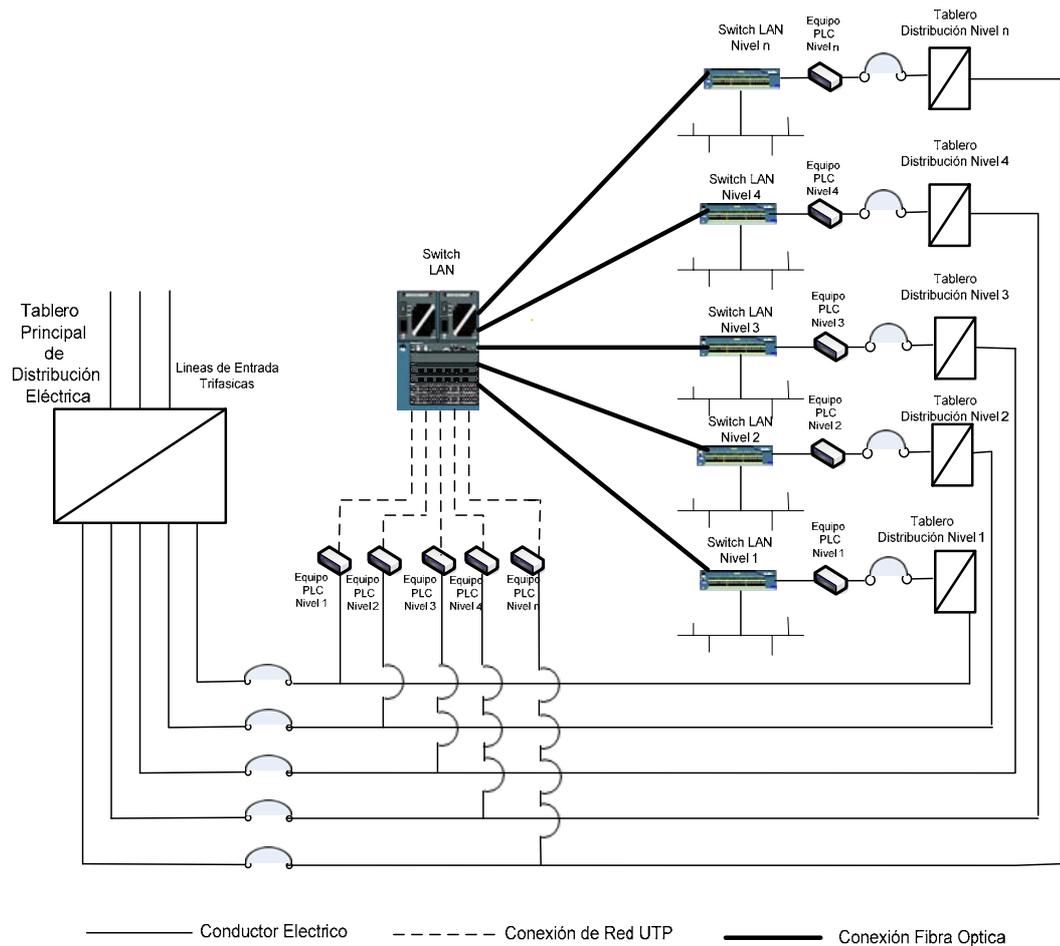
9. Cory L. Clark. **Lab View: Digital Signal Processing and Digital Communication**. 1ra. Edición. Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill, 2005.
10. Oppenheim Allan V. **Discrete-Time Signal Processing**. 2da. Edición. Estados Unidos: Prentice Hall, 1999.

Referencia Electrónica

11. <http://kim.ece.buap.mx/comunikece/archivos/ruido.pdf>
12. <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/handle/2238/121>
13. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/martinez_v_da/capitulo1.pdf
14. <http://carcamal.ele.cie.uva.es/CEM/articulos/Perturbaciones.pdf>
15. <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/121/1/BJFIE200275.pdf>
16. <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/ruido-t.pdf>
17. <http://kim.ece.buap.mx/comunikece/archivos/ruido.pdf>

ANEXOS

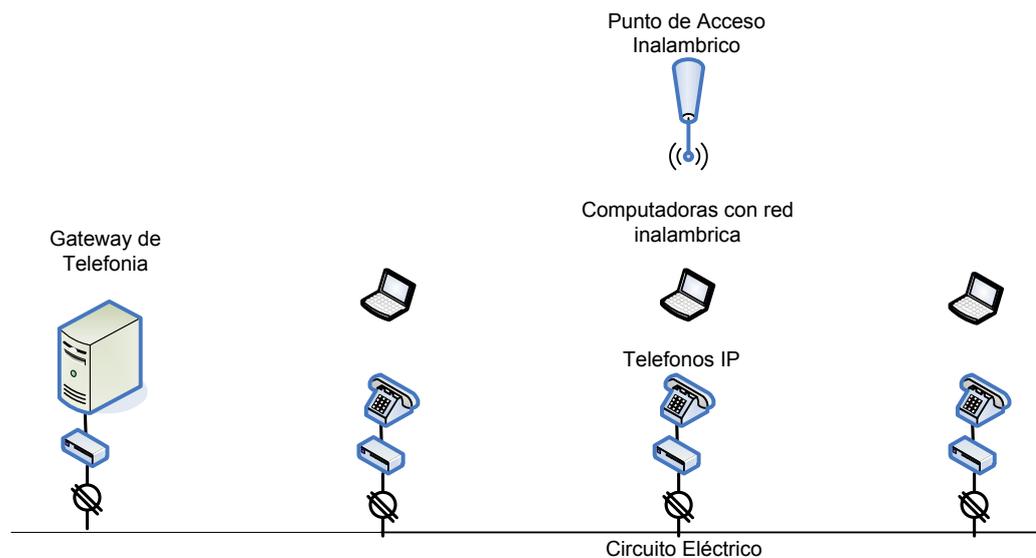
DIAGRAMA DE CONEXIÓN UTILIZANDO PLC COMO SISTEMA REDUNDANTE DE LAS CONEXIONES PRINCIPALES EN UNA RED LOCAL



Fuente: Elaboración Propia

Este diagrama se puede seguir para utilizar la tecnología PLC como redundancia de conexiones de fibra óptica en un edificio, teniendo la menor interferencia posible por ruidos eléctricos. El sistema PLC entra en funcionamiento solamente si existe una falla en las fibras ópticas. El diagrama puede ser utilizado por cualquier ambiente similar (plantas industriales, comercios, empresas), donde no se tenga un sistema de redundancia de red.

DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE UNA RED HIBRADA PLC Y RED INALÁMBRICA SIN CABLEADO NI CONCENTRADORES DE RED



Fuente: Elaboración Propia

Se puede hacer una sistema híbrido de comunicación de voz y datos, utilizando PLC para transportar la telefonía y red inalámbrica para la transmisión de datos. De esta forma se obtiene una red eficiente sin tener que invertir en cableado estructurado ni concentradores de red (*switches*), los cuales son de costo elevado.

Especificaciones técnicas de los equipos utilizados para las pruebas

Equipo Netgear XE103

Power Requirements	100~240V AC
Dimensions	98mmx 72mm x 40mm (Height x Width x Depth)
Weight	0.146kg
Operating temperature	32° to 104° F (0° to 40°C)
Operating humidity	90% maximum relative humidity, noncondensing
Powerline standard	HomePlug 1.0
HomePlug Frequency	4.3-20.9 Mhz
Data Encoding	HomePlug 1.0: Othogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), DQPSK, DBPSK, ROBO
HomePlug Security	DES (56 bit)
Electromagnetic emmissions	FCC Part 15 Class B; CE-EMC Class B
Power and Safety	UL Listed (UL 1950) /cUL IEC950; CE LVD

Feature		Description
Encryption Utility		Enabled
Network		
	Port Speed	Auto-negotiation
	Port Duplex	Auto-negotiation
Administration		
	Device password	See product label.
	Management IP Configuration	DHCP
PowerLine		
	Encryption password	HomePlug