



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DEL POSIBLE USO DE  
SUPERCONDUCTORES EN LA  
TECNOLOGÍA PLC**

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO  
P R E S E N T A N :  
**FEDERICO BARRIENTOS LÓPEZ**  
**OSCAR LUCARIO MATÍAS**



DIRECTOR DE TESIS  
DR. LUIS ANTONIO PÉREZ LÓPEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO 2014.

*Dedicado a:*

*Todo aquel que mantiene un objetivo inamovible, guiado por una convicción de logro y fe...*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me da día con día, así como el permitirme concluir esta etapa.

A mis padres, Guadalupe y Silvestre por todo su apoyo, amor y comprensión a lo largo de mi vida y trayectoria académica, permitiéndome llegar a alcanzar este sueño.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, así como a sus académicos por brindarme las herramientas y formación necesarias para superarme y salir adelante día a día, de una forma humana y ética.

Al doctor Luis Antonio Pérez, así como a los honorables miembros del jurado, por ser parte de este gran logro, por su orientación y sobre todo apoyo para culminar esta etapa e iniciar una nueva, gracias.

A Ángela Aguilar por su amor, apoyo y motivación, así como el estar a mi lado hasta el final de este camino; gracias te amo.

A todos y cada uno de ustedes, ¡Gracias!

Federico Barrientos López  
¡México, Pumas, Universidad!

## AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo y sincero agradecimiento a mi fuente divina que me dota cada día del sentido invaluable de la vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por ser parte de mi formación con estricto apego humano y enseñanza de calidad junto a sus catedráticos y miembros del jurado quienes día a día se comprometen por la educación y por venir de nuestro país.

Al Doctor Luis Antonio Pérez, por su apoyo, dedicación y conocimiento brindado en la realización de este trabajo.

A mis padres, Roque y Martina, que me han guiado con sabiduría, principios y amor incondicional.

A mis hermanos Raquel y David por ser unas magníficas personas, quienes me han puesto el ejemplo.

A *Abi* por ser esa persona increíble que me colma de cariño, amor y enseñanzas.

El culminar de manera satisfactoria un objetivo más que me he determinado, me motiva a continuar con un espíritu de logro, impulsado por una mentalidad ganadora que sin la palabra *decisión* no sería posible...

A todos con admiración y respeto, ¡Infinitas Gracias!

Oscar Lucario Matías

¡México, Pumas, Universidad!

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	2
-------------------	---

### CAPÍTULO I

#### **SUPERCONDUCTIVIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y SEÑALES DIGITALES**

1.1 Introducción: Antecedentes de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).....	4
1.2 Esquema general de un Sistema Eléctrico de Potencia .....	4
1.3 Aspectos a considerar para el correcto funcionamiento de un SEP .....	5
1.3.1 Calidad del servicio .....	5
1.3.2 Continuidad del servicio .....	5
1.3.3 Regulación de tensión .....	6
1.3.4 Control de la frecuencia .....	6
1.4 Líneas de media y baja tensión .....	7
1.5 Uso de superconductividad en la transmisión de energía eléctrica .....	8
1.5.1 Propiedades de los materiales superconductores .....	9
1.5.1.1 Resistencia cero y temperatura crítica .....	10
1.5.1.2 Efecto Meissner, corrientes y campos críticos .....	11
1.5.1.3 Cuantización del flujo magnético .....	13
1.5.2 Propiedades específicas de los superconductores a altas temperaturas ....	13
1.5.2.1 Anisotropía .....	13
1.5.2.2 Propiedades mecánicas .....	14
1.5.2.3 Estabilidad química .....	14
1.5.2.4 Efectos de la radiación .....	14
1.5.2.5 Pérdidas en corriente alterna .....	14
1.6 Transmisión paralela de energía e información .....	15
1.7 Referencias .....	16

## **CAPÍTULO II**

### **TECNOLOGÍA PLC (POWER LINE COMMUNICATIONS)**

2.1 Introducción .....	19
2.2 Definición de la tecnología PLC .....	19
2.2.1 Características .....	19
2.2.1.1 Tipos de PLC .....	20
2.2.1.2 Funcionamiento .....	20
2.2.1.3 Esquema general de la tecnología PLC .....	21
2.2.1.4 Equipos PLC de media y baja tensión .....	24
2.3 Técnicas de modulación PLC .....	26
2.4 Ventajas y desventajas .....	31
2.5 Marco Legal y Normativa .....	32
2.5.1 Estandarización .....	33
2.6 Ámbitos de aplicación .....	34
2.7 Referencias .....	35

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN CONDUCTORES CONVENCIONALES Y SUPERCONDUCTORES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

3.1 Introducción .....	38
3.2 Pérdida de potencia en líneas de transmisión (cables convencionales) .....	40
3.3 Pérdida de potencia en líneas de transmisión (cables superconductores) .....	46
3.4 Comparativo de pérdida de potencia entre cables convencionales y superconductores .....	47
3.5 Referencias .....	54

<b>CONCLUSIÓN</b> .....	56
-------------------------	----

## **APÉNDICE**

<b>CÓDIGO EN MATLAB</b> .....	58
-------------------------------	----

# INTRODUCCIÓN

---

---

En ingeniería, la electrónica es la disciplina que ha mostrado un continuo desarrollo en la investigación de materiales semiconductores y circuitos integrados, ya que gracias a su estudio, es posible crear aplicaciones que contribuyen a la simplificación y/o ejecución de tareas orientadas al desarrollo de diversas áreas del conocimiento humano, tales como: la física, química, biología, medicina, instrumentación, control, informática y las telecomunicaciones, entre otras.

El uso de los sistemas de telecomunicaciones se ha incrementado rápidamente durante la última década, ya que la necesidad de comunicarse de manera eficiente e inmediata se ha vuelto imperativa; por lo cual, es necesario idear nuevas alternativas en servicios de telecomunicaciones, así como, tecnologías con capacidades adicionales de transmisión que satisfagan la demanda creciente del servicio con un carácter versátil, eficiente y que minimice el impacto al ambiente. Una de estas alternativas de comunicación es la tecnología Power Line Communications (PLC).

La tecnología PLC permite el uso de las redes de suministro de energía eléctrica para fines de comunicación y acceso a los servicios de comunicación de banda ancha, teniendo como idea principal la reducción de costos operativos y la implementación de nuevas redes de telecomunicaciones.

No obstante, debido a que dicha tecnología emplea como medio de transmisión los conductores de la red del suministro eléctrico, las pérdidas por transmisión son inherentes, por lo que en este trabajo se plantea el posible uso de superconductores para solucionar este efecto de pérdida y así obtener mayor eficiencia en la transmisión.

Para cumplir el objetivo, en el Capítulo I se describen de manera sintetizada los antecedentes y esquema general de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP); así como, los aspectos a considerar para el correcto funcionamiento del mismo, tomando en cuenta la importancia de las líneas de media y baja tensión para este trabajo; continuando con superconductividad, destacan las propiedades de los materiales superconductores, así como las propiedades específicas de los superconductores a altas temperaturas, siendo éstos el foco de estudio que permiten el alcance de esta investigación.

A fin de entender el concepto de transmisión paralela de energía e información, en el Capítulo II se explicarán los aspectos que definen y caracterizan la tecnología PLC, las técnicas de modulación empleadas, el marco legal y normativa con que se rige actualmente, su viabilidad en el mundo de las telecomunicaciones en competencia con otras tecnologías de banda ancha y campos de aplicación.

Por último, en el Capítulo III se llevará a cabo el análisis comparativo de las pérdidas de potencia por unidad de longitud en conductores convencionales y superconductores en líneas de transmisión, logrando determinar el posible uso de superconductores en la tecnología PLC.

# **CAPÍTULO I**

## **SUPERCONDUCTIVIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y SEÑALES DIGITALES**

---

## 1.1 Introducción: Antecedentes de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)

El desarrollo de los sistemas de energía eléctrica tuvo sus inicios en 1882 con las instalaciones de Edison en la ciudad de Nueva York, aunque existían unas cuantas instalaciones de alumbrado con lámparas de arco eléctrico [1.1].

El suministro de la energía eléctrica se realizaba mediante corriente continua a baja tensión, haciendo uso de generadores o dinamos desarrollados por Zénobe Théophile Gramme (1826 - 1901) [1.1].

Los primeros sistemas de distribución estaban constituidos por dos hilos a una tensión constante, dado que la carga principalmente eran lámparas incandescentes de filamento, las cuales no requerían de una gran tensión para su funcionamiento. El aumento de la carga, posteriormente, hizo necesario el uso de tres hilos en los sistemas de distribución [1.1].

El uso de estos sistemas de transmisión de corriente continua a baja tensión estaban limitados ya que la distancia de transmisión de la energía eléctrica era deficiente así como la regulación en la calidad del servicio, por lo que era necesario encontrar otras formas de transmitir la energía eléctrica con una mayor eficiencia y calidad [1.1].

El desarrollo de los sistemas de transmisión de energía eléctrica de corriente alterna se inició en los Estados Unidos en el año 1885, cuando George Westinghouse compró las patentes americanas que protegían el transporte de corriente alterna, desarrollado por el invento del transformador de L. Gaulard y J.D. Gibbs [1.1].

William Stanley, un antiguo socio de Westinghouse, en el invierno de 1885-1886, instaló la primera red experimental de distribución de corriente alterna conocida como Stanley. La primera línea de transporte de corriente alterna en los Estados Unidos se puso en funcionamiento en el año de 1890, desde la central hidroeléctrica de Willamette Falls hasta Portland, Oregón. Estas primeras líneas de transmisión eran monofásicas, principalmente, su uso estaba en el alumbrado [1.1].

El principal motivo por el que la distribución de la energía eléctrica a través de la corriente alterna tuvo una gran aceptación fue debido a que se puede transmitir grandes cantidades de energía eléctrica superando las distancias alcanzadas por corriente directa [1.1].

## 1.2 Esquema general de un Sistema Eléctrico de Potencia

Los principales elementos de un sistema de transmisión y de distribución de energía eléctrica son: Plantas generadoras, subestaciones elevadoras, sistema de transmisión, subestaciones reductoras, sistemas de distribución y cargas; como se muestra en el siguiente diagrama de bloques [1.1]:

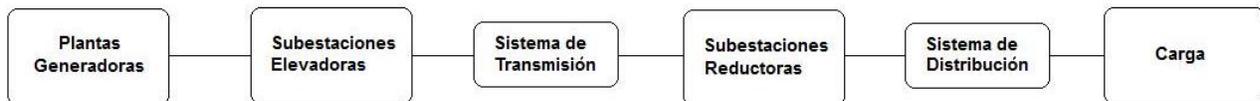


Figura 1.1 Esquema General de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) [1.1].

Las plantas generadoras, ya sean termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas, de ciclo combinado, nucleares, entre otras, son las principales fuentes de transformación y generación de la energía eléctrica. En ellas se inicia la transmisión de la energía. A la salida de los generadores de las plantas la tensión es elevada para realizar la distribución de la misma [1.1].

La elevación y la reducción de la tensión, así como la interconexión de los distintos elementos del sistema se realizan en las subestaciones eléctricas, que constituyen los nudos de la red, cuyas ramas están constituidas por las líneas de transmisión o conductores eléctricos. De acuerdo a la función de cada subestación, estas se pueden clasificar en [1.1]:

- Subestaciones elevadoras de las plantas generadoras
- Subestaciones de interconexión de la red de alta tensión
- Subestaciones reductoras de alimentación de sistemas de subtransmisión o distribución

Por lo tanto, al conjunto de estos elementos que operan con el fin de satisfacer las necesidades de suministro eléctrico se conoce como Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) [1.1].

### **1.3 Aspectos a considerar para el correcto funcionamiento de un SEP**

Para el correcto funcionamiento de un SEP, es de suma importancia tomar en cuenta los aspectos que aseguren un suministro eléctrico eficiente, con el fin de cubrir las necesidades de demanda en el servicio de cada usuario. Estos aspectos son:

#### **1.3.1 Calidad del servicio**

El suministro de la energía eléctrica debe de realizarse siempre con una óptima calidad. Dicha calidad queda definida por tres factores: la continuidad del servicio, la regulación de tensión y el control de la frecuencia [1.1].

#### **1.3.2 Continuidad del servicio**

En la actualidad, la energía eléctrica es un recurso indispensable para realizar la mayor cantidad de tareas de la vida cotidiana, y el hecho de presentarse una interrupción en el suministro causaría pérdidas económicas de alto impacto, así como un caos social, intensificándose más aún si nuestro sistema de transmisión y distribución es usado como medio de transporte de datos de telecomunicaciones [1.1].

Por tales razones, es necesario tomarse en cuenta las disposiciones necesarias para enfrentar una falla en algún elemento del sistema con el objetivo de asegurar la continuidad del suministro. Las principales disposiciones son [1.1]:

- a) Disponer de la reserva de generación adecuada, en caso de una posible salida de servicio.
- b) Disponer de un sistema de protección automático que permita eliminar cualquier elemento del sistema que haya sufrido alguna avería.
- c) Diseñar un sistema de tal manera que permita que la falla o desconexión tenga la menor repercusión posible en el resto del sistema
- d) Disponer de circuitos de alimentación de emergencia para hacer frente a cualquier falla.
- e) Disponer de los medios necesarios para el pronto restablecimiento del servicio [1.1].

### **1.3.3 Regulación de tensión**

Todo dispositivo que utiliza energía eléctrica está diseñado para operar a una tensión determinada, lo cual mantiene en óptimo desempeño su funcionamiento, bajo la condición de que la tensión aplicada se mantenga en un cierto límite y este no varíe [1.1].

Gran parte de los equipos electrónicos están diseñados para operar con una tolerancia de  $\pm 5\%$  de tensión nominal, lo cual hace ver que regular esta tensión sea de suma importancia en un SEP. La regulación de tensión en una línea de media tensión deberá ser del 5% máxima, partiendo desde las subestaciones, siendo aceptable una variación de  $\pm 10\%$  en el sistema [1.1].

### **1.3.4 Control de la frecuencia**

Los SEP operan a una frecuencia determinada, dentro de cierta tolerancia. Actualmente no existe una normalización internacional para establecer una frecuencia única de operación. En Europa, la mayor parte de Asia, África y algunos países de Sudamérica han adoptado una frecuencia de 50 [Hz]; mientras que en América del Norte y otros países del continente americano los sistemas eléctricos operan a 60 [Hz] [1.1].

El rango de las variaciones de frecuencia aceptables en un sistema eléctrico depende principalmente de dos factores [1.1]:

1. Las características de las cargas conectadas al sistema.
2. El funcionamiento del sistema mismo [1.1].

Las cargas resistivas son, evidentemente, insensibles a las variaciones de frecuencia; sin embargo, las cargas inductivas y capacitivas son afectadas en mayor o menor grado por las variaciones de frecuencia, siendo una de estas, la variación del signo de la potencia consumida [1.1].

Para el conjunto de la carga de un sistema eléctrico, un 1% de disminución de la frecuencia causa una disminución del orden del 1.5% a 2% de la carga [1.1].

Desde el punto de vista del funcionamiento del SEP, debe considerarse que si los generadores conectados al sistema están girando a la velocidad correspondiente a la frecuencia nominal, esto significa que existe un equilibrio entre la potencia real producida por los generadores y la potencia real absorbida por las cargas, más las pérdidas del sistema [1.1].

Las características de las cargas conectadas al sistema originan un desequilibrio que se ve reflejado en una variación de la velocidad de rotación de las máquinas y en consecuencia de la

frecuencia. Los reguladores de velocidad o gobernadores de cada turbina registran esta variación y actúan sobre las válvulas de admisión de fluido a la turbina, llegando a un nuevo estado de equilibrio del sistema eléctrico. Sin embargo, este nuevo estado de equilibrio se establece a una frecuencia ligeramente distinta de la nominal, debido a las características de operación de los reguladores de velocidad, necesarias para lograr que la operación de varias unidades generadoras en paralelo sea estable [1.1].

Así también, la distribución de la generación entre distintas unidades se habrá alterado y en general no corresponderá a una distribución óptima; por esto, es necesario un sistema de control adicional que restablezca la frecuencia a su valor nominal y reparta la generación entre las distintas unidades de forma adecuada. Para lograr esto, se requiere un control de la frecuencia de mayor precisión que el que sería necesario de acuerdo a las características de las cargas; por esta razón actualmente los controladores de frecuencia poseen una precisión de  $\pm 0.05$  [Hz] [1.1].

Finalmente, entre las características que debe cumplir la frecuencia de un sistema, puede incluirse su pureza, es decir, que el porcentaje de armónicas sea despreciable. Esto requiere que los generadores proporcionen una tensión lo más aproximadamente posible a una tensión sinusoidal; así como limitar a valores tolerables la aparición de armónicas en otros puntos del sistema, como pueden ser los circuitos magnéticos de los transformadores [1.1].

La presencia de armónicas causa pérdidas adicionales que pueden afectar el funcionamiento de ciertas cargas y producir, también, fenómenos de resonancia que dañen a los equipos [1.1].

En general, las armónicas de las ondas de tensión existentes en un SEP representan un porcentaje suficientemente reducido con relación a la onda fundamental para no ocasionar problemas; sin embargo, cuando estas se presentan se debe casi siempre a la producción de armónicas de algún aparato del consumidor [1.1].

#### **1.4 Líneas de media y baja tensión**

Se considera como línea de transmisión al medio físico mediante el cual se lleva a cabo el transporte de la energía eléctrica a grandes distancias, hasta los puntos de consumo [1.2].

Las líneas de media tensión son aquellas líneas de transmisión de energía eléctrica que operan en un rango de 13 [kV] hasta 33 [kV] [1.3].

Dentro de las líneas de media tensión se consideran como tramos cortos a aquellos que tienen una longitud menor de 65 metros y tramos largos a aquellos cuya longitud es mayor a los 65 metros. Los tramos cortos se implementan principalmente en las zonas urbanas, ya que se determinan por los tramos de baja tensión, mientras que los tramos largos se implementan en zonas rurales en donde las comunidades se encuentran alejadas unas de otras. Un tramo menor a 40 metros se le denomina como “tramo flojo” y es aquel donde la tensión mecánica de los conductores es menor al 40% de la indicada en tablas de flechas y tensiones a la temperatura del lugar donde se encuentran [1.3].

En las líneas de media tensión aéreas se montan conductores desnudos y semiaislados principalmente. El conductor mínimo a utilizar en este tipo de líneas debe ser un cable de cobre 1/0, ASCR 1/0 y AAC 1/0. La selección de los conductores para líneas de distribución de media tensión es realizada mediante un estudio técnico – económico que tome en cuenta todas las

variables que se presenten de acuerdo al caso, como son el tipo de terreno, el clima predominante en el lugar, entre otros [1.3].

En electrificación de colonias o fraccionamientos urbanos, las caídas de voltaje de la línea de media tensión desde el punto de conexión al punto extremo o crítico de esta no debe exceder el 1% de la tensión nominal [1.3].

Se consideran como líneas de baja tensión a aquellas líneas de transmisión de energía eléctrica que operan por debajo de los 13 [kV].

Las tensiones eléctricas de las líneas de baja tensión están normalizadas como sigue:

SISTEMA	TENSIÓN ELÉCTRICA
2F - 3H	120/240 V
3F - 4H	220Y/127 V

Las líneas de baja tensión son instaladas en un nivel inferior a las líneas de media tensión y de equipos.

Los conductores que se utilizan en estas instalaciones de baja tensión deben ser de acuerdo a la especificación de Comisión Federal de Electricidad: CFE E0000-09, CONDUCTORES MÚLTIPLES PARA DISTRIBUCIÓN AÉREA HASTA 600 [V] PARA 75 [°C], con cable mensajero de tipo ACSR para fases de aluminio o de cobre con fases de cobre. El forro del conductor debe ser una cubierta aislada que evita fallas por contactos eventuales con objetos o ramas de árboles [1.4].

La longitud mínima del poste para instalaciones de baja tensión será de 9 m [1.4].

## 1.5 Uso de superconductividad en la transmisión de energía eléctrica

En el año de 1908, el físico Kamerlingh Onnes (1853 - 1926), consiguió licuar Helio (He) a una temperatura de 4.2 K, dando inicio a una nueva era en el estudio de las propiedades físicas de materiales a temperaturas cercanas al cero absoluto [1.5].

Más tarde, en el año de 1911, Onnes encontró que la resistencia del Mercurio (Hg), cuando se enfría a 4.2 K, tiene un valor de resistividad tan pequeño que es imposible medirlo, es decir, cuando la resistencia eléctrica se hace nula al enfriar a muy bajas temperaturas el material y este conduce sin resistencia alguna (superconduce) a este fenómeno se le conoce como superconductividad [1.2]. Para verificar que la resistencia eléctrica es efectivamente cero, Onnes llevó a cabo el siguiente experimento: en un recipiente con Helio líquido introdujo un anillo superconductor con una corriente eléctrica circulando por él. Si el anillo tuviese una resistencia diferente de cero, la corriente eléctrica en él decrecería gradualmente y el campo magnético creado por dicha corriente cambiaría con el tiempo. Durante todo el tiempo que transcurrió antes de que el Helio líquido se evaporara, el campo magnético no presentó ninguna alteración. Este experimento fue repetido en la década de 1950, y durante el año y medio que un anillo similar estuvo en observación, el resultado fue el mismo: el campo magnético, producido por la corriente en el anillo, no cambió [1.5].

Rápidamente se dio inicio al uso de bobinas superconductoras para la generación de campos magnéticos, sin embargo, pronto se encontró un obstáculo en el uso de los superconductores: un

límite superior para la corriente que fluye en el superconductor, siendo este lo que hoy llamamos la corriente crítica  $I_c$ . Esta dificultad no pudo ser eludida hasta décadas más tarde, cuando se dieron cuenta, a través del trabajo teórico, que un tipo diferente de superconductor era necesario; esta nueva clase de superconductores iban a ser llamados “tipo II”, en oposición a los anteriores conocidos como “tipo I” (Estaño y Plomo) y conductores similares estudiados en Leiden. Por otra parte, con los materiales de “tipo II” se pudo elevar el límite de corriente crítica para tener superconductores con usos más prácticos, tales como cables superconductores en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica [1.5].

En 1986 se descubrieron superconductores de tipo II con una temperatura crítica “alta”, los cuales son compuestos cerámicos que contienen tierras raras así como planos de cobre y oxígeno [1.5]. Estos materiales pueden ser enfriados por debajo de su  $T_c$  mediante el uso de Nitrógeno líquido (LN2), un refrigerante relativamente barato y fácil de manejar en comparación al Helio líquido [1.6].

El uso de cables superconductores en la transmisión de energía eléctrica presenta una ventaja con respecto a los conductores utilizados convencionalmente, debido a que las pérdidas resistivas son mucho menores. Sin embargo, hay que considerar que podría haber pérdidas debido al sistema imperfecto de bombeo de nitrógeno líquido, así como pérdidas hidráulicas debido a la fricción en el flujo de nitrógeno líquido circulante [1.6].

De manera similar a las líneas de transmisión convencionales, las líneas de transmisión con superconductores también tienen pérdidas por blindaje dieléctrico, aislamiento térmico imperfecto, así como pérdidas en corriente alterna. Algunas de estas pérdidas podrían reducirse, pero no eliminarse, mediante la creación de un vacío entre el cable superconductor y el aislante térmico [1.6].

### **1.5.1 Propiedades de los materiales superconductores**

Entre las principales propiedades de un superconductor, podemos mencionar, además de su composición química, la temperatura crítica, la corriente crítica, el calor específico electrónico y su comportamiento ante la aplicación de un campo magnético externo. Como veremos más adelante, con base a esto último los superconductores pueden clasificarse como tipo I y tipo II [1.5].

Cabe mencionar que este trabajo mantendrá un enfoque dirigido a las propiedades eléctricas de los superconductores y no en las propiedades químicas o termodinámicas de los mismos.

A pesar de que la superconductividad se descubrió en 1911, no fue sino hasta 1957 que surgió la primera teoría cuántica, hoy conocida como teoría BCS\* [1.7]. Esta teoría logró explicar las propiedades físicas de los superconductores conocidos hasta entonces, hoy llamados superconductores convencionales y que comprenden algunos metales y aleaciones metálicas, cuyas temperaturas críticas no exceden los 25K [1.5]. Sin embargo, esta teoría no pudo explicar el mecanismo que da lugar a la superconductividad en los cerámicos superconductores de alta temperatura crítica.

---

\* La Teoría BCS, propuesta por John Bardeen, Leon Neil Cooper y John Robert Schrieffer (BCS) en 1957, es la primer teoría microscópica de la superconductividad desde su descubrimiento en 1911. La teoría de la superconductividad se describe como un efecto microscópico causado por una condensación de pares de Cooper en un estado similar al bosón (partícula oculta en los materiales de óxido de cobre) [1.7].

### 1.5.1.1 Resistencia cero y temperatura crítica

La resistencia eléctrica  $R$  de un material conductor es medida en Ohms ( $\Omega$ ) y se determina por el área de la sección transversal, la longitud del conductor, así como la resistividad de dicho material. La resistencia de un conductor viene dada por la siguiente expresión [1.8]:

$$R = \rho \left( \frac{l}{A} \right)$$

donde:

$\rho$ : resistividad o resistencia específica del material conductor

$l$ : longitud del conductor

$A$ : área de la sección transversal del conductor

Se muestra a continuación la resistividad de algunos materiales conductores convencionales:

MATERIAL	Resistividad $\rho$ (20 °C-25 °C) [ $\Omega \cdot m$ ]
Cobre (Cu)	$1.71 \times 10^{-8}$
Aluminio (Al)	$2.82 \times 10^{-8}$
Plata (Ag)	$1.55 \times 10^{-8}$
Hierro (Fe)	$9.71 \times 10^{-8}$

Una propiedad de importancia fundamental de los materiales superconductores es su resistividad  $\rho=0$  por debajo de una temperatura crítica  $T_c$  y la transición a un estado de resistividad finita  $\rho_n$ , por encima de la temperatura crítica  $T_c$  [1.5]. Este aspecto es cualitativamente ilustrado en la figura 1.2.

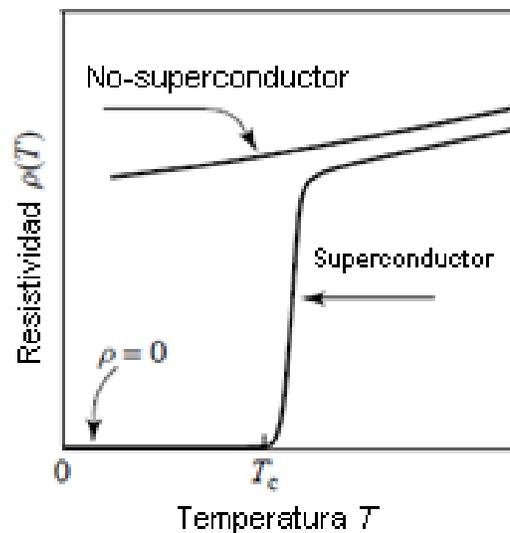


Figura 1.2 Resistividad como función de la temperatura para un conductor normal en comparación con un material superconductor [1.5].

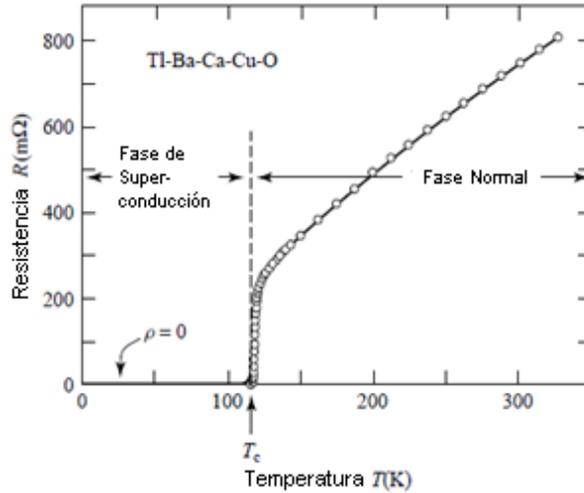


Figura 1.3 Mediciones reales de resistividad como función de la temperatura en un material superconductor de alta temperatura crítica [1.5].

Debido a que en un material superconductor la resistividad es cero por debajo de su temperatura crítica  $T_c$ , la resistencia eléctrica también será cero sin importar su longitud o área transversal [1.5]. Por otra parte, como ya se mencionó, los materiales superconductores presentan resistencia cero por debajo de cierta temperatura, específica de cada material, llamada temperatura crítica ( $T_c$ ) [1.9]. Para los superconductores convencionales dicha temperatura no supera los 40 K, lo cual limita su uso en grandes instalaciones mientras que los cerámicos superconductores de alta  $T_c$  tiene temperaturas críticas superiores a la temperatura de licuefacción del nitrógeno.

### 1.5.1.2 Efecto Meissner, corrientes y campos críticos

Cuando un superconductor dentro de un campo magnético se enfría por debajo de la temperatura crítica  $T_c$ , las líneas de campo magnético son expulsadas del superconductor. Es decir, un campo magnético no puede existir dentro de un superconductor [1.10].

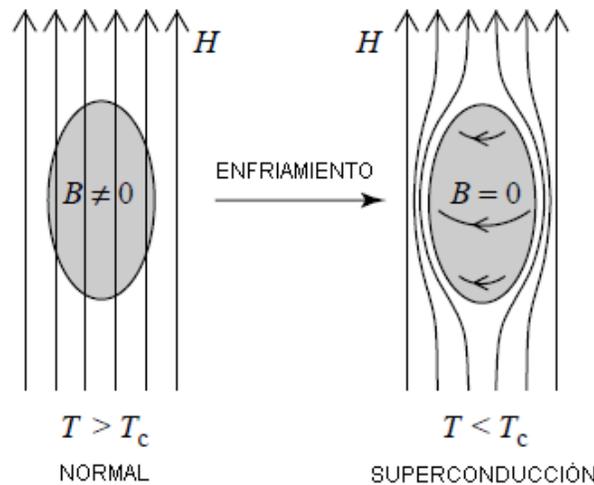


Figura 1.4. Efecto Meissner en un superconductor [1.5]

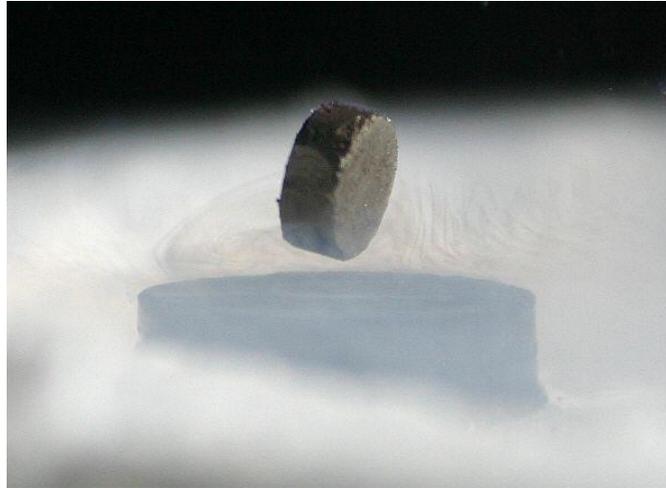


Figura 1.5 Efecto Meissner: Imán flotando sobre una pastilla superconductora.

Es importante enfatizar que un superconductor no sólo tiene resistividad nula, sino también expulsa campos magnéticos débiles de su interior. De acuerdo con su comportamiento ante la presencia de un campo magnético externo, los superconductores pueden clasificarse como *tipo I* ó *tipo II*. Los superconductores de *tipo I*, mientras permanezcan en el estado superconductor, son completamente diamagnéticos, es decir, cualquier campo aplicado será expulsado del cuerpo del material (*Efecto Meissner*). A medida que el campo magnético aplicado  $H$  se incrementa, el material permanece diamagnético hasta que se alcanza un *campo crítico*  $H_C$ . En este momento la conducción se hace normal y el flujo magnético penetra completamente en el cuerpo. Varios elementos metálicos tales como el aluminio, plomo, estaño y mercurio pertenecen al grupo de *tipo I* [1.12].

Los superconductores de *tipo II* son completamente diamagnéticos para campos aplicados pequeños y la exclusión del campo es total. Sin embargo, a partir de un *campo crítico inferior*,  $H_{C1}$ , las líneas de flujo magnético comienzan a penetrar gradualmente el cuerpo del material y la densidad de estas líneas aumenta conforme el campo magnético aplicado crece, hasta llegar a un *campo crítico superior*,  $H_{C2}$ , donde la penetración del campo es completa y el material pasa del estado superconductor al estado normal [1.12]. Para campos entre  $H_{C1}$  y  $H_{C2}$ , el material está en un estado que se denomina mixto: existen regiones del material en estado normal y otras en estado superconductor [1.13].

Otra propiedad muy importante de los superconductores es su *corriente crítica*  $I_c$ , esto es, la máxima corriente que se puede hacer pasar por el material antes de que se detecte una caída de potencial distinta de cero debido a las pérdidas resistivas que presenta el material al dejar de ser superconductor [1.11]. Se ha comprobado que la corriente máxima que puede circular por un superconductor está limitada mientras se mantenga en este estado de superconductividad [1.11].

### 1.5.1.3 Cuantización del flujo magnético

Cuando un anillo superconductor es enfriado en presencia de un campo magnético, en el instante de atravesar  $T_c$ , el flujo es expulsado del anillo. Al mismo tiempo el flujo magnético en el interior del anillo se ajusta a un valor igual a un número entero de veces el cuanto de flujo  $\phi_0 = 2.06 \times 10^{-15}$  [T·m<sup>2</sup>]. Además, si se elimina el campo magnético aplicado, el flujo dentro del anillo no cambia.  $\phi_0$  es una cantidad extremadamente pequeña (el campo magnético terrestre, es del orden de 0.4 Oersted [Oe] que produce en una espira de 1 [cm<sup>2</sup>] un flujo de  $2 \times 10^6 \phi_0$ ) [1.17].

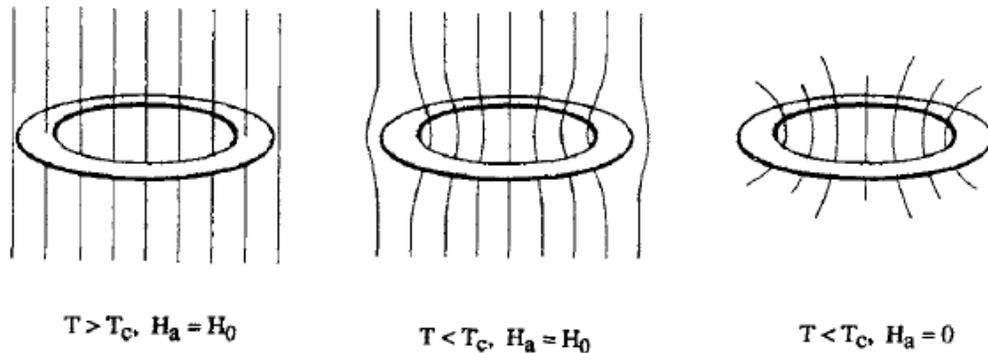


Figura 1.6. Representación esquemática de la cuantificación del flujo magnético en un anillo superconductor cuando es enfriado por debajo de  $T_c$ , en presencia de un campo aplicado  $H_a = H_0$ . Aunque se elimine a  $H_a$  el flujo en el interior del anillo no cambia [1.17].

## 1.5.2 Propiedades específicas de los superconductores a altas temperaturas

Como se ha mencionado, la superconductividad sigue siendo un tema aún en estudio. En la actualidad se sigue experimentando con nuevos materiales superconductores para que se acerquen lo mayormente posible a temperatura ambiente, que harán que la necesidad de enfriar los cables superconductores quede en el pasado. Algunas de las propiedades específicas de los superconductores se citan a continuación.

### 1.5.2.1 Anisotropía

Hasta el momento se han descubierto tres familias de materiales superconductores a altas temperaturas (SAT), con  $T_c$  mayor a los 77 [K] [1.18]:

- M-Ba-Cu-O donde M=Y, Nd, La, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, con  $T_c$  entre los 85 y 95 [K]
- Bi-Sr-Ca-Cu-O con una  $T_c$  entre los 85 y los 110 [K]
- Tl-Ca-Ba-Cu-O con aproximadamente 120 [K] [1.18]

Los SAT se sintetizaron en un inicio como materiales cerámicos con granos de diferente tamaño y diversa orientación. Las corrientes críticas, de  $1$  a  $10^3$  [A / cm<sup>2</sup>], y los campos críticos de muy pocos Oe, estaban determinados por los contactos débiles entre los cristales orientados aleatoriamente. Esto hacía que la aplicación de estos superconductores fuera impensable y poco factible. En la actualidad, se han encontrado y fabricado materiales de manera masiva orientados con muy buenos contactos entre granos y películas delgadas con crecimiento epitaxial (proceso de fabricación de circuitos integrados, que asocia dos minerales de diferente especie, entre los cuales existe una compatibilidad estructural, en virtud de la cual, los cristales de ambos cuerpos se desarrollan, uno sobre el otro, en determinadas direcciones) que presentan corrientes críticas para diferentes aplicaciones, entre las que destacan la transmisión de energía eléctrica [1.18].

### **1.5.2.2 Propiedades mecánicas**

Algunos SAT suelen ser duros pero muy frágiles al momento de hacer uso de ellos, por lo cual su fabricación suele presentar algunas dificultades. Una de las técnicas que se están usando hoy en día es la fabricación de cables mediante extrusión de polvos cerámicos en tubos de Ag y Cu o fibras orientadas. Debido a que el último tratamiento térmico de oxidación es el que confiere la fragilidad al material cerámico, éste debe aplicarse después del bobinado del conductor [1.18].

Para la fabricación de piezas en aplicaciones como cavidades de radiofrecuencia, pueden utilizarse las técnicas conocidas de mecanización de materiales cerámicos. El estudio de la adhesión de los SAT con otros materiales (sustratos), de la resistencia a los ciclos térmicos, etc., es esencial para las aplicaciones en micro-electrónica [1.18].

### **1.5.2.3 Estabilidad química**

Tanto el agua como el dióxido de carbono degradan a temperatura ambiente los SAT, con la formación de hidróxidos y carbonatos. Por otro lado, el oxígeno abandona fácilmente la estructura en vacío y a temperatura ambiente. Es por ello que se deben aplicar técnicas de protección de superficies, especialmente en películas delgadas [1.18].

### **1.5.2.4 Efectos de la radiación**

En ciertas aplicaciones, como la fusión por confinamiento magnético, la sensibilidad a la radiación de los materiales utilizados es de gran importancia. Los SAT son más sensibles a la radiación que los superconductores clásicos, pero varios órdenes de magnitud menos que los semiconductores, por lo que su uso resulta ser de gran interés para diversas aplicaciones electrónicas [1.18].

### **1.5.2.5 Pérdidas en corriente alterna**

Los superconductores convencionales presentan pérdidas en corriente alterna que afectan a las aplicaciones como son las líneas de transmisión de potencia a 50 [Hz], o dispositivos para microondas. En los SAT las pérdidas esencialmente se deben a los fenómenos de histéresis

magnética y se reducen sustancialmente al mejorar las uniones entre los granos y el grado de orientación [1.18].

## **1.6 Transmisión paralela de energía e información**

El uso de la red de energía eléctrica para control, mantenimiento y efectos de facturación de los servicios eléctricos tiene ya una larga historia. La liberación de las telecomunicaciones y servicios públicos de electricidad han añadido una nueva dimensión a la posible aplicación de la infraestructura eléctrica como un medio de transmisión. Por otra parte, el crecimiento de la Internet y servicios de telecomunicaciones acelerará la demanda de los mismos para un gran número de consumidores. Si estos servicios pueden ofrecerse a través de las redes de distribución eléctrica, una autopista de la información verdaderamente universal podría hacerse realidad, con la capacidad de proporcionar interconexión a todos los hogares, fábricas, empresas, oficinas y todas aquellas personas que requieran de un servicio de comunicación de fácil acceso [1.19].

Los circuitos eléctricos de distribución constituyen un sistema de cableado universal, pero que no fueron construidos para fines de comunicación. Diferentes niveles de impedancia y atenuación, debido a la conmutación de los equipos eléctricos, se presentan con frecuencia y la interferencia de diferentes fuentes conduce a un rendimiento muy pobre del sistema. Como resultado, la capacidad de transmisión está restringida a las limitaciones del ancho de banda, de la potencia y de los altos niveles de ruido que pueden presentarse en cualquier etapa de un SEP [1.19].

En 1838 se llevó a cabo la primera medición remota de suministro de electricidad. En 1897 se realizó la primera patente sobre la señalización de alimentación de línea propuesta en el Reino Unido. En 1905 se realizaron algunas aplicaciones de transmisión de datos a través de la red eléctrica que fueron patentadas en Estados Unidos y en 1913 se hizo la primera producción comercial de repetidores electromecánicos [1.19].

A finales de 1980, el control de errores se realizó con técnicas de codificación relativamente sofisticadas haciendo uso de hardware y módems PLC [1.19].

Las normas PLC han evolucionado constantemente a lo largo de los años, especialmente durante los últimos 20. Esto se dio a partir de 1994, con el aumento de potencia de las líneas digitales, lo cual promete nuevos ingresos para los servicios públicos de energía y acceso a Internet barato para los consumidores. Líneas de media tensión utilizadas como "backbones" para operadores de telecomunicaciones se han convertido en una tecnología madura. Es evidente que el objetivo principal es y seguirá siendo la conexión entre la casa y el transformador, como una solución para el problema de acoplamiento y ruido en la "última milla" y así poder seguir desarrollando estas aplicaciones de una forma comercialmente atractiva [1.19].

En esencia, lo que falta es un marco normativo claro. En Europa, el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) hace uso actualmente de aplicaciones de banda estrecha (3-148.5 [kHz]), con una potencia máxima de señal de 5 [mW] y velocidades de hasta 144 [kb/s] en distancias de alrededor de 500 [m]. Sin embargo, hoy en día estas aplicaciones parecen muy pobres y la investigación se ha centrado en las frecuencias de transmisión a través de líneas de alta tensión por encima de 1 MHz. Power Line Communications (PLC) es usado para velocidades de datos de varios megabits por segundo. Estos sistemas funcionan a través de redes de baja tensión de distribución de electricidad (LVEDNs) y son capaces de proporcionar comercialmente soluciones de acceso digitales de banda ancha muy atractivas. La necesidad de armonizar las tecnologías de banda ancha de acceso de telefonía fija con los servicios de radio existentes, de

modo que la convivencia puede ser optimizada, será un elemento clave en el rápido despliegue de la banda ancha de sistemas PLC. El tema de la Compatibilidad Electromagnética (EMC) y de banda ancha de la línea de alimentación (aplicaciones de comunicaciones PLC), que propone utilizar las secciones de las bandas de alta frecuencia, son ahora el foco de diversas investigaciones [1.19].

## 1.7 Referencias

- [1.1] Viqueira L. Jacinto, “Redes eléctricas, primera parte”, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., pp. 1, 4, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25,26, 27, México, 1970.
- [1.2] Muñoz Jesús, et al, “Las líneas de Transmisión en Base a Superconductores”, pp.2, Instituto Universitario de Tecnología, Venezuela, 2011.
- [1.3] Comisión Federal de Electricidad, “Normas de Distribución – Construcción – Instalaciones Aéreas en Media y Baja Tensión, Líneas de Media Tensión”, pp. 1, México 2010.
- [1.4] Comisión Federal de Electricidad, “Normas de Distribución – Construcción – Instalaciones Aéreas en Media y Baja Tensión, Líneas de Baja Tensión”, pp. 1, México 2010.
- [1.5] Fossheim Kristian, Sudbø Asle, “Superconductivity, Physics and Applications”, John Wiley and Sons, pp. 4,5,11,17,18,27, Inglaterra 2004.
- [1.6] Yankowitz Matthew, “Superconducting Power Transmission, Submitted as coursework for Physics 240”, Stanford University, Fall, Estados Unidos de América, 2010.
- [1.7] Kragh Helge, “Quantum Generations. A history of physics in the twentieth century”, Ediciones AKAL, S.A., pp. 367, Princeton University Press, 1999. Estados Unidos de América 2007.
- [1.8] Ginzburg V.L., Andryushin E.A., “Superconductivity”, World Scientific Publishing, pp. 3,4, P. N. Lebedev Physics Institute, Russia, 2004.
- [1.9] Serway A. Raymond, Jewett W. John Jr., “Electricidad y Magnetismo”, International Thomson Editores, pp.140, México, 2005,6a ed.
- [1.10] Tipler A. Paul, “Física Moderna”, Reverté S.A., pp.377, España 2003.
- [1.11] Vélez F. María, “Corriente Crítica y Mecanismo de Disipación en Películas y Superredes de Superconductores de Alta Tc (Relación con la microestructura y propiedades de anisotropía)”, pp. , Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales, España, 1995.
- [1.12] Callister D. William, Jr. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2”, Reverté, S.A., pp. 709, España 1996.
- [1.13] Zamora Miguel, “Termo I, Un estudio de los sistemas termodinámicos”, Egondi Artes Gráficas, pp. 473, Universidad de Sevilla 1998.

- [1.14] Lifshitz Landau, "Física Teórica, Física Estadística Vol. 9, parte 2", pp. 238, Reverté S.A., España, 1986.
- [1.15] Newrock Richard, "What are Josephson junctions? How do they work?" Scientific American TM Magazine, November 24, 1997.
- [1.16] Kragh Helge, "Generaciones Cuánticas, una historia de la física en el siglo XX", Akal S.A., pp. 367,368, Madrid España, 2007.
- [1.17] Mosca Tipler, "Física para la Ciencia y Tecnología", Reverté S.A., pp. 885, España 2005, 5a ed.
- [1.18] Rillo Conrado., "Aplicación de los materiales cerámicos superconductores de alta temperatura crítica", pp. 2, 3,4; IEEE, Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón, C.S.I.C. Universidad de Zaragoza, 1991.
- [1.19] Pavlidou Niovi, Vinck A. J. Han, Yazdani Javad and Honaty Bahram, "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends", IEEE Communications Magazine, April 2003.

**CAPÍTULO II**  
**TECNOLOGÍA PLC**  
**(POWER LINE COMMUNICATIONS)**

---

## 2.1 Introducción

El incremento en la demanda de servicios de telecomunicaciones y la conciencia colectiva del uso eficiente de los recursos disponibles para el desarrollo de nueva infraestructura presentes en la última década, han sido factores del desarrollo y estudio de nuevas tecnologías en esta rama de la ingeniería que brinden al usuario versatilidad en el manejo y acceso a la información y servicios digitales; para lo cual se utiliza la tecnología PLC. En este capítulo se explicará la definición de dicha tecnología, así como los aspectos fundamentales que permitirán entender su funcionamiento, normativa y estandarización con que se rige. Finalmente, se dará un panorama de los ámbitos de aplicación que han sido implementados recientemente.

## 2.2 Definición de la tecnología PLC

En la década de 1920, al menos dos patentes fueron emitidas a la *American Telephone and Telegraph Company* en el campo de la "transmisión y transporte a través de circuitos de energía". Las patentes de Estados Unidos, 1.607.668 y 1.672.940, presentadas en 1924 muestran un sistema para transmitir y recibir señales de comunicación a lo largo de un cableado trifásico de AC. El espectro de propagación de potencia comercial en las líneas de comunicación ha sido el foco de la investigación y desarrollo de dispositivos en una serie de empresas desde principios de la década de los 80's. Algunos investigadores han sugerido que lo que se requiere para la comunicación digital es una versión comercializada de la tecnología militar de propagación del espectro [2.1].

Históricamente, la tecnología PLC tiene un número reducido de aplicaciones, pero ahora, y a través del estudio de esta tecnología, se está abriendo la posibilidad de que sea reconocida universalmente como un modo primordial para la transmisión de señales digitales [2.2].

Con el surgimiento de la banda ancha, la demanda para la transmisión de voz y datos a través de Internet en el hogar, escuelas y empresas aumenta continuamente [2.2]. Mientras que la población va en aumento, la necesidad de comunicación entre estas es inevitable, teniendo así que la implementación de cableado especial sea una necesidad de las comunidades y ciudades en diferentes partes del mundo. Esta opción resulta ser una inversión de alto costo, además de una implementación que requiere un tiempo considerable [2.2].

La tecnología PLC permite el uso de la infraestructura de la red eléctrica existente para proporcionar capacidades de red de alta velocidad [2.2], es decir, la tecnología PLC permite la convivencia entre señales analógicas y digitales en un mismo canal de transmisión a través de una infraestructura ya existente, siendo esta, la red de distribución eléctrica de media y baja tensión, de ahí su nombre Power Line Communications (PLC).

### 2.2.1 Características

Las líneas de comunicaciones de banda estrecha comenzaron poco después del inicio del suministro de energía eléctrica. Alrededor del año 1922, los primeros sistemas de soporte de frecuencia operaban a través de líneas de alta tensión, en un rango de frecuencias de 15 a 500 [kHz], para fines de telemetría, continuando esto hasta la actualidad [2.2].

Dentro de las principales características que definen a esta tecnología se tiene:

- Es una tecnología de banda ancha.
- No presenta los inconvenientes de cableado ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) que limita el acceso de servicio al usuario final. Al estar ya implementada la red eléctrica permite llegar a un gran número de usuarios donde esté presente esta red.
- Posibilidad de implementar servicios como Internet de alta velocidad, telefonía VoIP, videoconferencias, VPN's (*Virtual Private Network*), redes LAN, juegos online, teletrabajo y comercio electrónico.
- Proceso de instalación sencillo y rápido para el usuario final, sin necesidad de obras ni cableado adicional.
- Múltiples puntos de conexión a los servicios digitales a través de tomas de alimentación en un sitio.

### 2.2.1.1 Tipos de PLC

La tecnología PLC se denomina en forma diferente dependiendo el país y organismo que la estudie:

- PLC/PLT (Power Line Communications/Power Line Transmission), según ETSI (European Telecommunications Standards Institute)
- DPL/BPL (Digital Power Line / Broadband Over Powerline), según la FCC (Federal Communications Commission) en los Estados Unidos.

### 2.2.1.2 Funcionamiento

La tecnología PLC aprovecha los tramos de Media y Baja Tensión para el transporte de datos [2.3]. Con un adecuado acondicionamiento de la red de transmisión y distribución de energía eléctrica, es posible transmitir señales digitales por encima de la banda de 1 MHz, sin verse afectado el rendimiento eléctrico, así como las señales digitales.

El lugar de integración entre el SEP y el sistema de comunicación es el transformador o la subestación de distribución, aquí es donde se produce el acoplamiento entre la red eléctrica y los equipos complementarios que se enlazan a una conexión de datos de alta velocidad proporcionados por un proveedor de internet, ya sea por fibra óptica u otro medio, a un control PLC.

La transmisión paralela de energía y señales digitales a través de los conductores eléctricos, de manera simultánea, es posible dado que las dos señales son diferentes y son enviadas a distintas frecuencias. Mientras que la energía eléctrica es transmitida a una frecuencia de 50 – 60 [Hz], la tecnología PLC ocupa un espectro de Alta Frecuencia (*High Frequency, HF*), cuyo rango de frecuencias varía dependiendo del tipo de tecnología empleado; por ejemplo, en banda estrecha se emplea un rango de frecuencia por debajo de los 500 [kHz] (CENELEC), mientras en banda ancha las frecuencias se encuentran alrededor de los 2 a 30 [MHz] (Home Plug AV) [2.4].

Las velocidades de transmisión dependen del tipo de tecnología que se emplee (Home Plug 1.0, Home Plug AV, entre otras), el estado de las líneas de transmisión, así como los equipos PLC dentro del sistema son:

Del año 2000 a 2002: de 1 a 4 Mbps con modulación DSSS / GMSK (primera generación)

Del año 2001 a 2003: de 10 a 45 Mbps con modulación OFDM (segunda generación)

Del año 2003 en adelante: mayores de 100 Mbps con *Dense* OFDM (tercera generación) [2.5].

En la actualidad, durante el *Consumer Electronics Show (CES)*, en las Vegas, se dio a conocer a través de la Home Plug Powerline Alliance, la especificación AV2 que alcanza velocidades muy cercanas a los 1000 [Mbps] [2.6].

La tecnología PLC utiliza dos vertientes de acceso: PLC de Acceso Outdoor y Redes de Área Local Indoor.

Para hacer uso de esta tecnología como una red de acceso, es necesario que en los centros de transformación de energía eléctrica se instalen dispositivos *Head End* (HE) de PLC, comunicados a su vez con el proveedor de servicios de internet. Estas terminales pueden ubicarse en la estación con una estructura típica de rack y cada uno puede ofrecer servicios a unos 50 usuarios [2.7].

La señal PLC que llega a los hogares debe ser amplificada por medio de repetidores, los cuales suelen ubicarse en los cuadros de distribución de los edificios u hogares, justamente después de los medidores. En los casos de los edificios de gran altura puede ocurrir que la señal llegue sin problema alguno hasta un cierto nivel de la estructura, pero irse degradando la señal conforme supere este nivel. Análogamente, este problema puede ocurrir en edificios cuya topología sea complicada y por lo tanto se tengan grandes distancias eléctricas. En ambos casos se requiere la instalación de repetidores adicionales, o bien, la configuración del modem de algunos de los clientes como un repetidor para los demás usuarios [2.7]. Es por ello que la inversión necesaria por cada usuario está directamente relacionada con el número de domicilios servidos por cada transformador de media a baja tensión. La estructura de redes de media y baja tensión en países de Europa facilita el negocio de la tecnología PLC [2.7].

La tecnología PLC en su vertiente Indoor, convierte la línea eléctrica en una red de área local y saca partido, por tanto, del hecho de que la infraestructura de conectividad ya existente y con una instalación sencilla, pueda convertir cada tomacorriente en un puerto de datos simultáneo con la red de energía eléctrica [2.7].

Algunas fuentes de ruido para la señal PLC son los motores, lámparas fluorescentes, lámparas de halógeno, interruptores y otras que se encuentren dentro del sitio [2.7].

### **2.2.1.3 Esquema general de la tecnología PLC**

Como con la mayoría de las tecnologías de comunicación de datos de alta velocidad, PLC requiere el uso de routers, conmutadores y repetidores para proporcionar una segmentación de la red que sea consistente con el ancho de banda, número de usuarios y servicios proporcionados [2.8].

La red de comunicaciones de datos se superpone a las redes de distribución de servicios públicos. Esto requiere un número de dispositivos de red intermedios posicionados en la subestación (nodo-

S), de alcance medio, como repetidores (nodo-R), en la distribución del transformador (nodo-X) y en el hogar, de acuerdo a la instalación del usuario, equipos de entrada o Gateway (nodo-GW) [2.8].

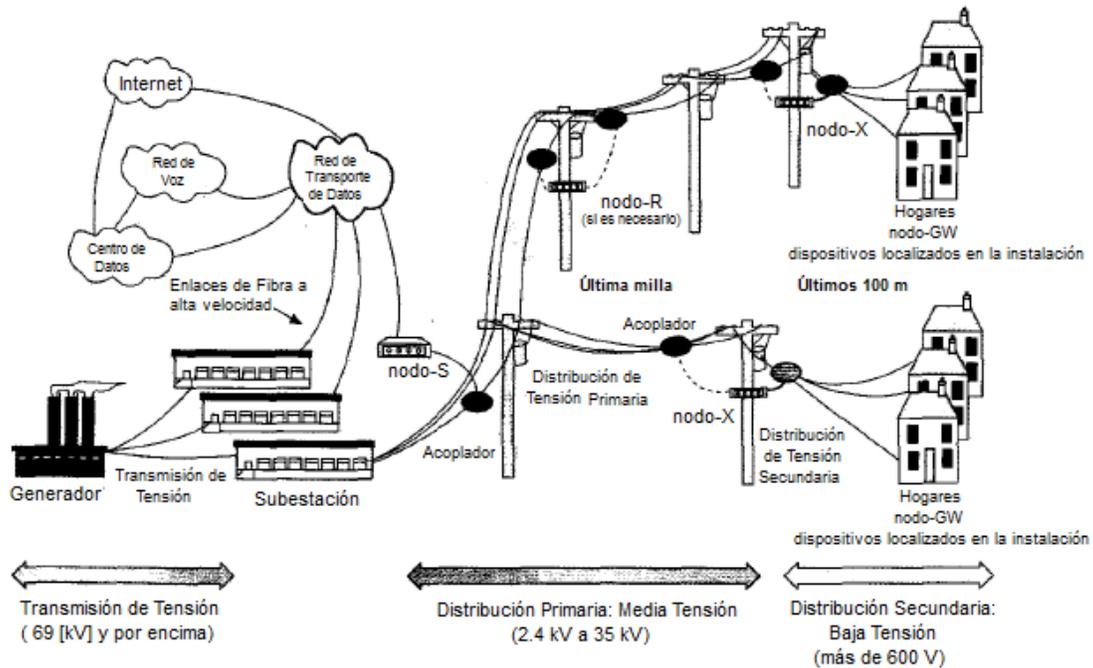


Figura 2.1 Esquema general de la tecnología PLC [2.8].

### Subestación nodo-S

El nodo-S es utilizado para conectar la red PLC a las redes de transporte de datos; es decir, la red de Internet, la red telefónica pública conmutada y otras. Por lo general, se puede instalar en las subestaciones de media tensión donde se conectan varias líneas de distribución del mismo nivel de tensión. Sin embargo, los nodos-S también pueden instalarse en otro lugar en el sistema de distribución donde la conectividad de la red de transporte de datos sea necesaria o deseable [2.8].

### Transformador nodo-X

El transformador, nodo -X, transfiere los datos entre las líneas de media tensión y baja tensión, y puede servir de repetidor a lo largo de la línea de media tensión. El nodo -X, facilita su ubicación en cualquier poste de distribución, debido a su construcción de tipo modular, el cual puede colocarse en el medio ambiente [2.8].

### Gateway nodo-GW

La conexión de red PLC se proporciona en las instalaciones del cliente con el nodo-GW. Este nodo contiene una interfaz de PLC, que se conecta a una toma de corriente estándar de baja tensión en el interior de la casa, siendo de construcción modular para permitir una variedad de otras interfaces

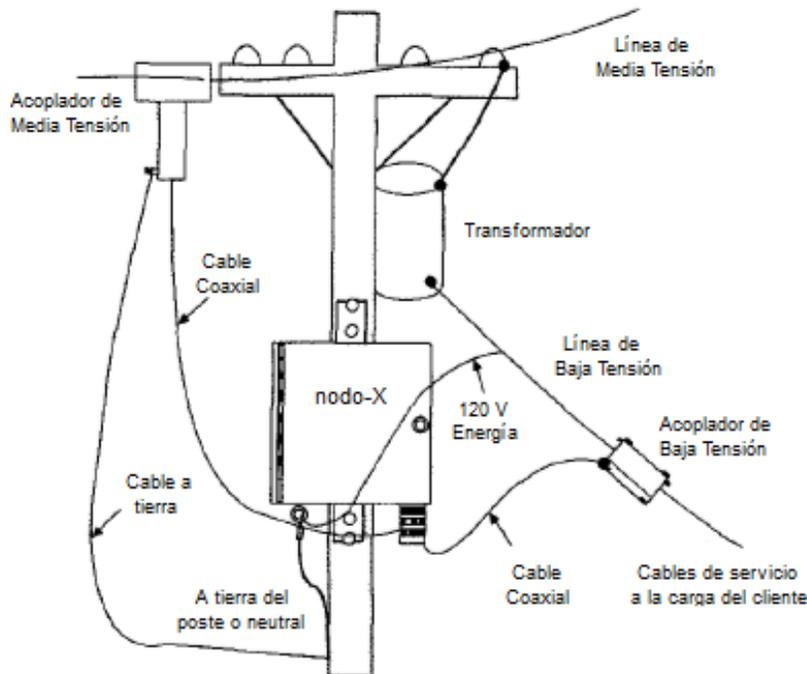
para servicios en el hogar, tales como el soporte a una red de datos o servicios de telefonía con puertos telefónicos analógicos estándar [2.8].

La naturaleza modular del nodo-GW puede soportar distintas redes, tales como inalámbrica, Home Plug (en el hogar PLC) o Home PNA (*Home Phoneline Networking Alliance*; datos a través del cableado telefónico). El sistema está diseñado para permitir instalaciones secuenciales y expansiones que corresponden a la demanda real del cliente [2.8].

### Transformador de trayectoria *BYPASS*

El diseño del sistema PLC utiliza el transformador de distribución para entregar la señal a las instalaciones del usuario final. Estos transformadores atenúan significativamente la mayoría del espectro de RF utilizado para PLC [2.8]. Por lo tanto, un enfoque es crear un trayecto para que la señal de RF pueda rodear o evitar el transformador de distribución. Sin embargo, es imperativo que este camino se limite solamente a la señal de RF y no al de energía a 60 Hz [2.8].

Las ventajas de este recorrido de derivación del transformador son su bajo costo y facilidad de instalación así como de mantenimiento, además de que no se degrada la fiabilidad general del sistema de distribución eléctrica. La trayectoria de derivación del transformador, como se muestra en la Figura 2.2, se compone de un acoplador inductivo de media tensión, un transformador de nodo-X, y un acoplador de baja tensión. El acoplador de baja tensión puede ser inductivo o capacitivo en función de la topología del sistema de distribución y otros factores [2.8].



Nota: Los cables mostrados son para la ilustración de los únicos puntos de conexión. En las instalaciones actuales los cables están asegurados y protegidos para cumplir con los requisitos de seguridad de servicios públicos normales y prácticas de instalación.

Figura 2.2 Transformador de trayectoria *BYPASS* [1.8].

El acoplador de media tensión es similar a una sola vuelta del transformador de corriente, donde la línea de media tensión es un devanado y el cable de señal es el otro devanado. El acoplador consiste en núcleos de ferrita montados en un cilindro de aislamiento. El aislamiento del cable secundario está hecho de material de alta rigidez dieléctrica. El acoplador está conectado a tierra en la parte inferior. La carcasa cilíndrica del acoplador permite que se sujete a la línea de media tensión adyacente a la línea de aislante, que se encuentra en la parte superior de un poste eléctrico. La instalación de las líneas de tensión se realiza de acuerdo con la utilidad y las prácticas de seguridad de la industria [2.8].

El acoplador de media tensión ha sido probado y calificado para la instalación de líneas de media tensión hasta 15 [kV]. Tiene una respuesta en frecuencia adecuada para el acoplamiento de señales de comunicación de alta velocidad en la gama de 2-50 [MHz] [2.8].

El diseño de la cubierta del acoplamiento permite que se instale en una línea energizada, lo que simplifica la instalación y reduce al mínimo el tiempo de instalación [2.8].

El transformador nodo-X está montado dentro del espacio de las comunicaciones en el poste y se enciende pulsando el circuito secundario de 120 [V]. La energía de la batería recargable de respaldo (opcional) es capaz de proveer varias horas de operación [2.8].

Ya sea un acoplador inductivo o capacitivo de baja tensión, este último presenta un mejor desempeño ante el ruido inherente a la línea de transmisión [2.8].

#### **2.2.1.4 Equipos PLC de media y baja tensión**

Mediante el trabajo conjunto de diferentes equipos PLC, es posible cumplir el objetivo de dicha tecnología, siendo éste la transmisión de señales digitales a través de la red eléctrica y brindar una opción de comunicación de banda ancha. A continuación se hace una breve descripción de estos equipos:

##### **Unidad de Acondicionamiento (UA)**

Es la unidad principal en las redes PLC, ya que gestiona el flujo constante de datos para mantener estable la transmisión [2.3].

Además, es la unidad que permite la conexión del sistema PLC con redes externas, ya sea un *backbone* de comunicaciones (WAN, Internet, etc.) o un ISP (*Internet Service Provider*). Esta unidad es la interfaz entre la red de datos y la red eléctrica [2.3].

Las Unidades de Acondicionamiento se sitúan en la subestación de distribución eléctrica, dependiendo del sistema de PLC a implementar. Cada UA puede ofrecer servicio a un cierto número de usuarios. Los datos que ingresan a estas estaciones son incorporados a la señal eléctrica, para que lleguen como una unidad al usuario final. Es fundamental que se encuentren ubicadas en puntos estratégicos, dado que es primordial lograr el mayor alcance y cobertura [2.3].

## **Unidad Repetidora**

Es la unidad encargada de extender el alcance de la señal. Su uso es de vital importancia cuando la distancia entre la Unidad de Usuario y la Unidad Acondicionadora es grande. Esta unidad se encarga de regenerar la señal que llega atenuada [2.3].

## **Unidad de Acoplamiento**

Estas unidades permiten adaptar e inyectar la señal digital PLC a la señal de la red eléctrica, ya sea de media o baja tensión. Lograr esto con un alto nivel de eficiencia, es el objetivo, para así entregar la señal específica de transmisión con el apropiado ancho de banda y el nivel de seguridad requerido, esto es uno de los principales retos de los sistemas PLC. Esquemáticamente, en el receptor se desea un fuerte rechazo de banda para bloquear la señal de 110 [V], 60 [Hz], pero sin atenuar las señales de alta frecuencia. Mientras que, en el lado del transmisor, se desea tener propiedades de paso amplio a la señal de comunicaciones para que no se vea atenuada. Por último, para que la atenuación de la señal sea pequeña, es necesario que el acople tenga una impedancia muy parecida a la de la señal de salida del nodo-X [2.3].

Existen dos métodos de acoplamiento:

- Acople Capacitivo: Empleado en la red de baja tensión, al ingresar a los hogares. Presenta una atenuación de la señal mínima y es de tamaño reducido, siendo la solución ideal para lugares poco espaciosos. Además, presentan menor pérdida que los inductivos, aunque su manipulación exige eliminar la corriente por los cables durante su instalación [2.3].
- Acople Inductivo: Empleado en la red que va desde la Unidad de Acondicionamiento hasta los repetidores. Este tipo de acople presenta ligeras pérdidas y no requiere conexión física con la red eléctrica, lo que lo hace más seguro de instalar que el acople capacitivo [2.3].

Tanto las Unidades de Acondicionamiento como las Unidades de Usuario poseen un equipamiento que contiene filtros para las señales de electricidad y de los datos, facilitando el acoplamiento entre clientes y la subestación eléctrica [2.3].

El equipo recibe la señal de la red eléctrica, la cual es introducida en un filtro pasa-bajo que permite el paso de las señales de baja frecuencia (donde viajan las señales de energía eléctrica) y las envía al puerto de distribución eléctrica (PDE) para su distribución, cancelando la señal de alta frecuencia [2.3].

Un filtro pasa-alto extrae la señal de alta frecuencia (donde viajan los datos) y cancela las señales de baja frecuencia. Los datos son liberados a través del puerto de distribución de comunicaciones (PDC) mediante interfaz Ethernet, USB, Wireless 802.11b u otra que posea el equipo PLC, facilitando el tráfico bidireccional entre el cliente y la red. El filtro pasa-bajo también permite atenuar los ruidos inducidos por las aplicaciones eléctricas, que de otro modo provocarían distorsiones significativas en la red [2.3].

## **Módems o Unidad de Usuario**

Los módems en la red PLC utilizan Multiplexado con División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), una técnica que ha demostrado ser muy útil en los canales selectivos en frecuencia y ruido impulsivo y ha sido aplicada con éxito en ambientes como la línea de abonado inalámbrica y digital (DSL) [2.8].

La banda de frecuencias utilizada oscila entre 2.46 [MHz] a 38 [MHz]. Los módems también ofrecen cifrado de capa física y de enlace de seguridad de los datos [2.8].

Entre las funciones que tienen los módems PLC se tienen:

- Facilitar la conexión con el usuario final
- Convertir cada tomacorriente en una toma de datos digitales
- Permitir la transmisión de voz, datos, video e internet
- Instalación sencilla “plug and play”
- No se requiere configuración por parte del usuario [2.3]

### **2.3 Técnicas de modulación PLC**

Existen diferentes técnicas de modulación empleadas para la transmisión de señales de comunicación a través de la red eléctrica. El adoptar una de ellas debe proporcionar una tasa de error de bits baja (*Bit Error Rate, BER's*), así como un bajo índice de relación señal a ruido; por lo tanto, se busca obtener un buen rendimiento en condiciones de atenuación (en el caso de la línea de transmisión), ocupar un mínimo de ancho de banda y en general hacer rentable su implementación. El desempeño de las técnicas de modulación es a menudo medido en términos de su potencia y eficiencia de ancho de banda. En sistemas de comunicaciones digitales, con el fin de aumentar la inmunidad al ruido, es necesario incrementar la potencia de la señal. Sin embargo, la cantidad de la potencia de la señal podría aumentarse para obtener un cierto nivel de fidelidad, es decir, una tasa de errores de bits aceptable, dependiendo del tipo particular de modulación empleada [2.9]. La tecnología PLC hace uso de cuatro técnicas de modulación principalmente, con las cuales la señal modulada logra transmitirse con una óptima calidad al usuario final. Estas técnicas son: Multiplexado con División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), Modulación de Espectro Distribuido (*Spread Spectrum Modulation, SSM*), Modulación de Multiportadoras de Espectro Distribuido (*Multi-carrier Spread Spectrum Modulation, MSSM*) y Modulación Discreta Multitono.

#### **Multiplexado con División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)**

Un canal Power Line puede ser caracterizado por múltiples atenuaciones, similares a las redes Wireless; esto es debido a un número concentrado de nodos y diferentes cargas conectadas. Así mismo, el retraso de las señales debido a dichas cargas y nodos crean interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference, ISI*). Debido a que las señales retardadas interfieren con las señales de origen, y degradan los sistemas, este retraso debe ser eliminado lo antes posible y el único medio para esto es a través de técnicas de ecualización; sin embargo, el logro de la ecualización en Megabits resulta complejo. OFDM está basado en la transmisión paralela de datos de banda ancha que reduce los efectos de múltiples trayectorias [2.9].

El Multiplexado con División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) es una técnica de modulación que divide un canal de comunicaciones en una serie de bandas de frecuencias equidistantes. Una subportadora que contiene una porción de la información es transmitida en cada banda. Cada subportadora es ortogonal a todas las demás subportadoras, diferenciando a OFDM de los multiplexados con división en frecuencia más comunes [2.10].

OFDM es una técnica de modulación con múltiples portadoras, la cual ha sido adoptada por sistemas de comunicación con alta velocidad de transferencia de datos. La popularidad de OFDM por su alta velocidad de transferencia de datos se debe principalmente a su eficiencia y su manejo flexible de la interferencia intersímbolos en canales altamente dispersivos [2.11].

Con el fin de tener un canal sin ISI, el tiempo del símbolo  $T$  debe ser más grande que la propagación del retraso del canal. Los sistemas de comunicación digitales no pueden operar si ISI está presente; mientras  $T$  se aproxima a  $\tau$ , la tasa de errores de bits se hace intolerable. A fin de superar este problema, la modulación con múltiples portadoras divide la alta tasa de bits a transmitir en  $L$  subcadenas de baja tasa de bits, cada una de las cuales tiene  $T/L \gg \tau$  y, por lo tanto, son libres de ISI. Estas subcadenas pueden ser enviadas sobre  $L$  subcanales paralelos, manteniendo el total de la tasa de datos deseada. Normalmente, los subcanales son ortogonales bajo la condición de propagación ideal, por lo que la modulación con múltiples portadoras es referida como OFDM. La tasa de datos en cada uno de los subcanales es mucho menor que la tasa total, por lo que el ancho de banda del subcanal es mucho menor que el ancho de banda total del sistema [2.12].

La modulación con múltiples portadoras divide la cadena de datos de banda ancha en  $L$  subcadenas de banda angosta, después cada una de ellas es transmitida sobre un subcanal de frecuencia ortogonal diferente. El número  $L$  de subcadenas se escoge para hacer que el símbolo del tiempo en cada subcadena sea mucho mayor que la propagación del retraso del canal o, lo que es equivalente, hacer el ancho de banda del subcanal menor que el ancho de banda del canal. Esto asegura que las subcadenas no experimentarán ISI significativo [2.12].

Esta técnica de modulación tiene interpretaciones interesantes en los dominios del tiempo y de la frecuencia. En el dominio del tiempo, la duración del símbolo en cada subportadora se incrementa a  $T = LT_s$ , por lo que hacer que  $L$  sea grande asegura que la duración del símbolo excede el retraso en la propagación del canal,  $T \gg \tau$ , que es un requerimiento para una comunicación libre de ISI. En el dominio de la frecuencia, las subportadoras tienen un ancho de banda  $B=L \ll B_c$ , lo que asegura desvanecimiento plano (*flat fading*), el equivalente a la comunicación libre de ISI en el dominio de la frecuencia [2.12].

Aunque este tipo de modulación simple, con múltiples portadoras, es fácil de entender, tiene varios defectos fundamentales. Primero, en una implementación realista hay una limitante en el ancho de banda debido a que las subportadoras no pueden tener la forma de pulsos rectangulares perfectos y están limitadas en tiempo. Además, filtros paso bajas de muy alta calidad serán requeridos para mantener la ortogonalidad de las subportadoras en el receptor. Y más importante, este esquema requiere  $L$  unidades de RF independientes y trayectorias de demodulación [2.12].

Para superar la necesidad de  $L$  unidades de RF en el transmisor y en el receptor, OFDM usa una técnica computacional efectiva, la Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT y su inversa, la IFFT, pueden crear múltiples subportadoras ortogonales utilizando una sola unidad de RF [2.12].

Se inicia agrupando  $L$  símbolos de datos en un bloque conocido como el símbolo de OFDM (OFDM symbol). Un símbolo de OFDM tiene una duración de  $T$  segundos, donde  $T = LT_s$ . Para mantener cada símbolo de OFDM independiente de los otros que irán a través del canal inalámbrico, es necesario introducir un tiempo de guarda entre los símbolos de OFDM tal como se muestra en la Figura 2.3 [2.12].

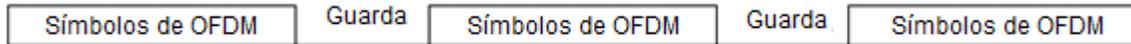


Figura 2.3 Tiempos de guarda entre los símbolos de OFDM

De esta manera, después de recibir una serie de símbolos de OFDM, mientras el tiempo de guarda  $T_g$  sea más largo que la propagación del retraso del canal, cada símbolo de OFDM sólo interferirá con él mismo [2.12].

La clave para hacer OFDM realizable en la práctica es el uso del algoritmo FFT [2.12].

En general la configuración de un sistema de transmisión OFDM se puede observar en la Figura 2.4:

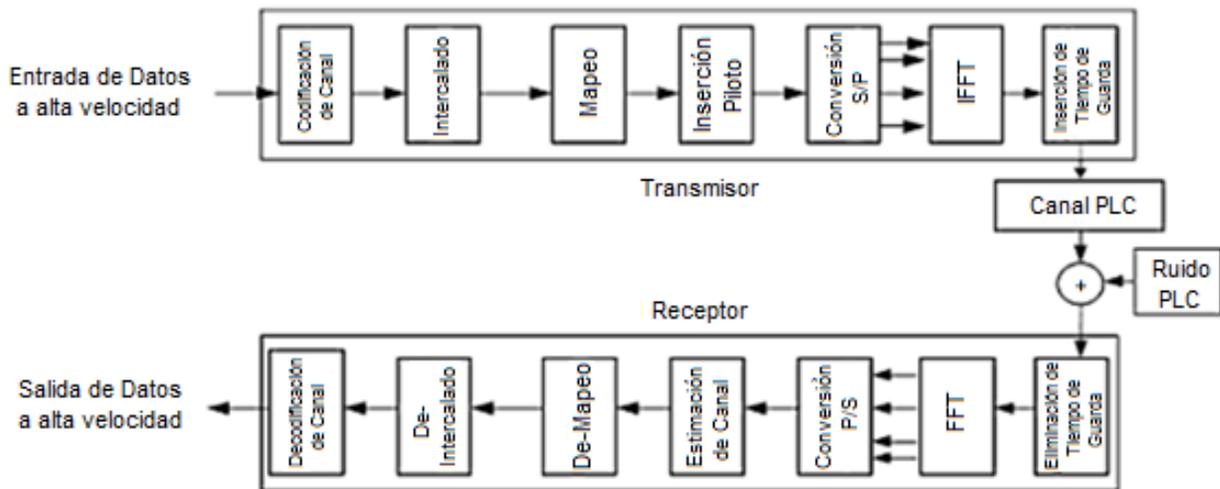


Figura 2.4 Configuración y esquema general de un sistema de transmisión OFDM [2.9].

Los datos de alta velocidad transmitidos son codificados e intercalados y después mapeados. Posteriormente los datos son distribuidos como una transmisión de datos paralelos en varios canales, en el cual los datos de alta velocidad son convertidos en datos paralelos lentos en múltiples canales. Incrementando el número de canales de transmisión paralela se reduce la tasa de transmisión que cada sub canal individual debe transmitir. Los datos de transmisión de cada sub canal paralelo son modulados por cualquiera de las dos técnicas M-ary phase shift keying (PSK) o M-ary QAM (M-QAM). Los datos son introducidos en un circuito que realiza una Transformada Rápida Inversa de Fourier para así generarse la señal OFDM. La señal es nuevamente introducida a un circuito de inserción de tiempo de guarda para reducir el ISI y después inyectarse a un canal de comunicación PLC. En el receptor, el tiempo de guarda es removido y la ortogonalidad de los canales puede ser mantenida usando un circuito que realice la Transformada Rápida de Fourier en el receptor. Dado que los datos en un circuito FFT son paralelos, la conversión paralelo a serie es necesaria y desde la línea de transmisión se hace uso

de un sistema de detección coherente y las estimaciones de canales son necesarias. Las estimaciones son importantes ya que con ellos los datos pueden ser demodulados correctamente. El desempeño de un esquema de modulación en cualquier canal de comunicación puede ser determinado a través del desempeño *BER* [2.9].

### Modulación de Espectro Distribuido (Spread Spectrum Modulation)

Durante la década de los años noventa, los fabricantes de equipos PLC de banda ancha trabajaron con la Modulación de Espectro Distribuido (SSM). Históricamente, este tipo de modulación fue usada por los militares para desarrollar canales de comunicación que fueran seguros, con una alta eficiencia en su ancho de banda y un buen comportamiento frente al desvanecimiento e interceptación de la señal. Gracias al desarrollo de Circuitos Integrados de Aplicación Específica (*Application Specific Integrated Circuit, ASIC*) y componentes electrónicos, este tipo de modulación ha sido exportado a la telefonía celular, redes de área local inalámbricas o módems de cable [2.13].

La secuencia directa del esquema de modulación de espectro hace uso de una técnica donde la forma de propagación de onda tiene mucha mayor frecuencia que la velocidad de los datos deseada. Siendo  $R$  la velocidad de datos de la señal, con un pulso  $T = 1/R$ , la velocidad de propagación transmitida es  $R_c$ , que se conoce como velocidad del circuito. La anchura de cada impulso en la secuencia de modulación  $T_c$  es conocida como duración del circuito. La Figura 2.5 muestra el esquema a bloques de un sistema de Modulación de Espectro Distribuido [2.9].

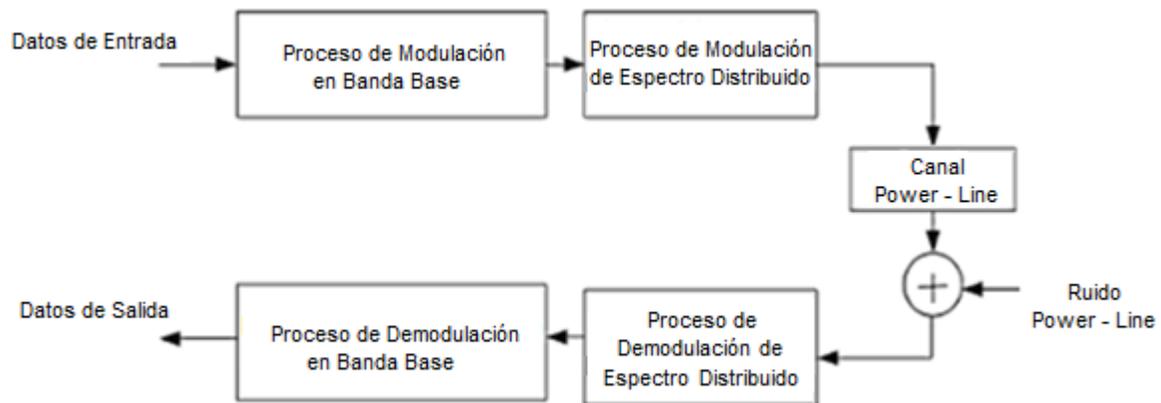


Figura 2.5. Diagrama a bloques de un sistema PLC de Banda Ancha (*Broadband Power Line Communication, BPLC*) basado en un esquema de Modulación de Espectro Distribuido [2.9].

Considerando un canal de transmisión como un multicanal con un ancho de banda coherente  $B_m$  y un canal con respuesta al impulso  $h(\tau, t)$ , como se muestra en la siguiente ecuación [2.9]:

$$h(\tau, t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i(t) e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad [2.9]$$

que es la inversa de la respuesta en frecuencia  $H(f)$  del canal de transmisión. El parámetro  $f_c$  es la frecuencia portadora,  $A_i(t)$  es el coeficiente de atenuación y  $\tau_i(t)$  es el retraso de la trayectoria  $i$ . La secuencia recibida de una señal por modulación de espectro se puede representar con la siguiente ecuación [2.9]:

$$\sum_{i=0}^L h_i s_d(t - \tau_i) c(t - \tau_i) + z(t) \quad [2.9]$$

En un sistema PLC, para códigos aleatorios de propagación, la salida de la modulación de fase binaria (*Binary Phase Shift Keying, BPSK*) del receptor puede ser aproximada por la ecuación [2.9]:

$$V_n = \left( \sum_{i=0}^{L-1} |h_i|^2 \right) \sqrt{E_b} a_n + z_n \quad [2.9]$$

Donde el término  $z_n$  es una componente de ruido complejo en el canal powerline, el cual es variable [2.9].

### **Modulación de Multiportadoras de Espectro Distribuido (*Multi-carrier Spread Spectrum Modulation, MCSS*)**

El sistema Broadband Power Line Communications, que se basa en la modulación de Modulación de Multiportadoras de Espectro Distribuido (MCSS), es una combinación de secuencias directas de propagación de espectro distribuido y modulación OFDM. La idea detrás de MCSS es difundir el símbolo de información sobre diferentes frecuencias de transmisión de cada chip. La modulación banda base puede ser PSK (*Phase Shift Keying*), QAM (*Quadrature Amplitud Modulation*) o PAM (*Phase Amplitud Modulation*). Desde que MCSS se basa en OFDM, resulta ser bastante efectiva en canales multi-trayectorias como en canales powerline, ya que tiene la capacidad de resolver toda la diversidad proporcionada por el canal [2.9].

## Modulación Discreta Multitono (DMT)

DMT es una aproximación en tiempo discreto de un sistema de modulación de multiportadoras. Se hace uso de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y la Transformada Inversa Discreta de Fourier (IDFT) para modular y demodular los datos para ser transmitidos. Las transformaciones pueden ser eficientemente implementadas con un procesamiento digital de señales (DSP) usando una Transformada Rápida de Fourier (FFT). En esta modulación, las subportadoras se refieren a veces como tonos que se modulan en una señal en tiempo real discreto por una operación de Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT). La Figura 2.6, muestra un diagrama a bloques de un sistema PLC basado en una Modulación Discreta Multitono, transmisor y receptor. Se puede observar que primero los datos son codificados por corrección de errores (FEC) dando pie a la constelación, mapeo y una mezcla de datos. Los datos mezclados son sujetos a una operación de Transformada Rápida de Fourier Inversa y posteriormente se inserta un prefijo cíclico para superar el ISI. Los datos son convertidos de formato digital a analógico (D/A), después es filtrada y transmitida en un canal powerline. Los datos transmitidos son recibidos en el filtro receptor, después, la operación de análogo a digital (A/D) es realizada y el prefijo cíclico es removido. Estos datos son sometidos a una operación FFT, después una constelación, un demapeo y después se realiza un mezclado de tono. Finalmente, se comprueban los errores de los datos recibidos y estos son corregidos usando un FEC decodificador [2.9].

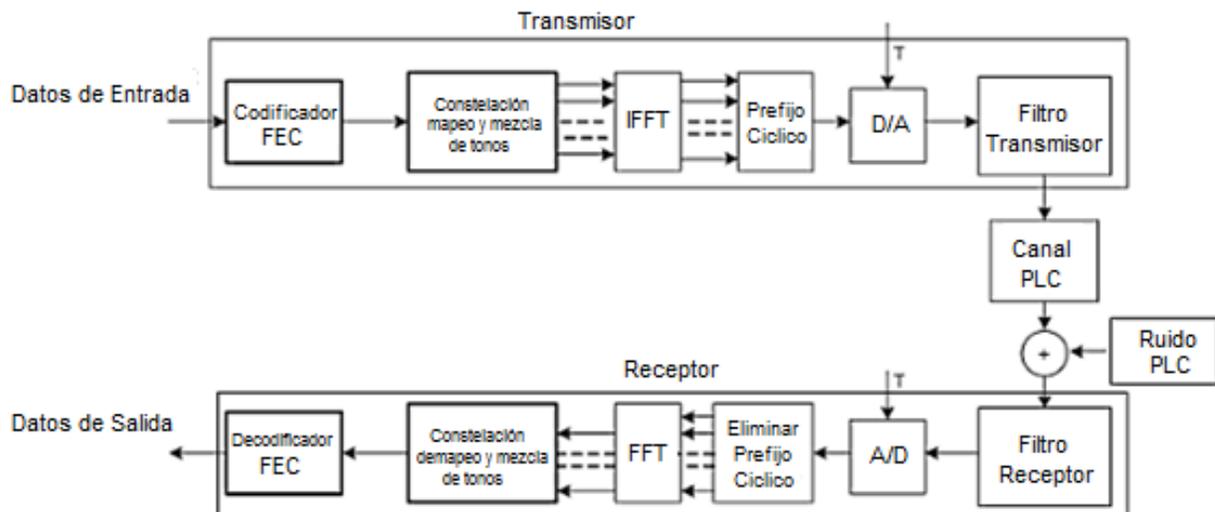


Figura 2.6 Diagrama a bloques de una Modulación Discreta Multitono, transmisor y receptor [2.9].

## 2.4 Ventajas y desventajas

### Ventajas

Entre las ventajas de esta tecnología, como se ha mencionado, está el uso de una infraestructura ya existente, con lo cual, es posible minimizar los costos así como el tiempo de implementación, además de su extenso alcance a zonas donde los servicios de telecomunicaciones no han llegado.

La velocidad de transmisión de banda ancha que se tiene actualmente hace que PLC pueda competir fácilmente con otras tecnologías como ADSL o fibra óptica. La velocidad registrada actualmente es de 1000 Mbps.

PLC es una alternativa técnicamente viable de Acceso de Banda Ancha que puede ser empleada para ofrecer servicios digitales como internet, telefonía IP [2.17], entre otras, dentro de un mismo sitio ya que cualquier tomacorriente se convierte en un nodo del servicio.

Desventajas.

El problema que existe en las redes de distribución de energía eléctrica de cualquier tipo (alta, media o baja tensión) es el ruido en el rango espectral de interés. En baja tensión, la mayor proporción de ruido es generada por los motores eléctricos, las luces fluorescentes, los dimmers o reguladores de intensidad luminosa. En alta tensión, la mayor proporción de ruido es debido a la radiación RF (de fondo, emisoras, atmosféricas) inducidas a lo largo de todo el tendido eléctrico. Finalmente, en media tensión, como los transformadores son adaptadores de impedancia con determinadas características, los centros de transformación se ven afectados tanto por los ruidos típicos de líneas de baja tensión como de alta tensión con unos niveles que dependen de la arquitectura de la red en cuestión [2.14].

La evaluación de cualquier tecnología de comunicación sólo es pertinente en el contexto de las características del entorno operativo. Este punto, aparentemente obvio, a menudo se pasa por alto en el análisis de libros de texto, pero no puede pasarse por alto en el campo de las telecomunicaciones en la línea eléctrica [2.1].

Una de las desventajas más frecuentes en esta tecnología es la propagación de la señal en la red eléctrica. Dado que los conductores o cables eléctricos tienen el parámetro de resistividad intrínseco de cada material, la propagación de la señal está sujeta a una atenuación proporcional a la longitud del conductor [1.15]. Esta desventaja trata de ser minimizada con una serie de repetidores colocados estratégicamente, con el fin de que la señal digital transmitida no pierda su potencia a lo largo de la red eléctrica.

## **2.5 Marco Legal y Normativa**

Cualquier tipo de tecnología que emplee una banda de frecuencia definida debe de situarse dentro de un marco legal. Las redes PLC, al ser al mismo tiempo redes de suministro eléctrico y de telecomunicaciones, resultan ser difíciles definirse dentro de un marco legal; además, no existe ninguna norma específica que regule los equipos y las redes PLC. En la actualidad se continúan realizando trabajos en el PLC Forum, la *Home Plug Powerline Alliance* y el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI) para llevar a cabo una normatividad de esta tecnología; sin embargo, a la fecha no se ha publicado algún resultado final [2.16].

En consecuencia, las instalaciones internas PLC (Indoor) son libres dentro de interiores u hogares, siempre y cuando estas no causen efectos negativos en el entorno donde esta tecnología sea utilizada, en tal caso esta sería retirada del sitio. Con respecto a las instalaciones externas (Outdoor) donde las señales se transmiten en los niveles de media y baja tensión, para crear bucles eléctricos locales, la autoridad reguladora en telecomunicaciones debe conceder los permisos para realizar pruebas [2.16].

## 2.5.1 Estandarización

Varias normas se han venido desarrollando para la estandarización de la tecnología PLC, entre las que destacan:

- European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Power Line Telecommunications (PLT). Este proyecto proporciona estándares y especificaciones necesarias para servicios de voz y datos sobre la línea de transmisión de energía y la red de distribución y/o construcción de cableado de electricidad. La norma aborda aspectos de interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes y la coexistencia de múltiples sistemas de líneas de alta tensión dentro del mismo entorno.
- Home- Plug Power-Line Alliance. La Home Plug Power Line Alliance es una organización global compuesta de 65 miembros de diferentes compañías. Su misión es permitir y promover rápidamente la disponibilidad, adopción e implementación costo – eficacia, interoperabilidad y estándares bases para redes power line dentro del hogar, así como sus productos. Dado que la tecnología Home Plug está basada en la contribución de múltiples compañías de todo el mundo, los estándares resultantes están a la espera del que ofrezca un mayor rendimiento y eficacia. La Home Plug Power Line Alliance ha definido algunos estándares como:
  - Home Plug 1.0. Especificaciones para conectar dispositivos vía Power Line en el hogar.
  - Home Plug AV. Designado para la transmisión de televisión de Alta Definición (HDTV) y telefonía VoIP alrededor del hogar.
  - Home Plug BPL. Un trabajo de grupo para el desarrollo de una especificación para “conexión doméstica”.
  - Home Plug Command and Control (CC). Esta es una especificación avanzada para permitir el mando y control dentro del hogar de luces, control de clima, seguridad, entre otras diversas aplicaciones y dispositivos en los hogares.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Los estándares se deben al estudio de grupo de BPL de la IEEE; algunos de estos estándares son:
  - IEEE P1675 “Standard for Broadband over Power-Line Hardware”. Es un grupo que trabaja en instalación de hardware y cuestiones de seguridad.
  - IEEE P1775 “Power Line Communications Equipment – Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements – Testing and Measurement Methods”. Es un grupo de trabajo enfocado en equipos PLC, condiciones de Compatibilidad Electromagnética (EMC) y pruebas y métodos de medidas.
  - IEEE P1901 “IEEE P1901 Draft Standard for Broadband Over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications”. Es un grupo de trabajo para el estudio de BPL, el objetivo es definir el control medio de acceso y las especificaciones de capa física para todas las clases de dispositivos BPL para conexiones de largas distancias a los usuarios locales [2.9].

- POWERNET. Esta es una investigación y desarrollo con financiamiento de la Comisión Europea. El objetivo es desarrollar un proyecto, así como la validación del mismo, de un dispositivo de comunicaciones, plug and play, para banda ancha sobre Power Lines (CBPL) que cumpla los requerimientos regulatorios de radiaciones electromagnéticas y pueda entregar grandes velocidades de datos digitales durante el uso de densidades espectrales de baja transmisión y trabajando en señal de bajo ruido [2.9].
- Open PLC European Research Alliance (OPERA). Esta es una investigación y desarrollo con financiamiento de la Comisión Europea. Su objetivo es desarrollar y/o mejorar servicios de PLC y sistemas de estandarización [2.9].
- Universal Power Line Association (UPA). La UPA alinea líderes de la industria en el mercado mundial de PLC para garantizar el despliegue de interoperabilidad y coexistencia de productos PLC en beneficio de consumidores de todo el mundo [2.9].

## 2.6 Ámbitos de aplicación

Como hemos mencionado anteriormente, la aplicación de la tecnología PLC, es hoy una realidad en diversas áreas, entre las numerosas aplicaciones de esta se tienen:

- Automatización de los hogares. PLC es una tecnología que puede hacer uso del cableado eléctrico dentro de los hogares y convertirse en un medio de comunicación. Esta es una técnica que puede usarse para la automatización de hogares inteligentes como control remoto de luces, puertas, video vigilancia, sensores de alarmas y otras aplicaciones dentro del hogar, sin la necesidad de instalar cableado especial para llevar a cabo estas tareas. Esto se basa principalmente en la Norma Industrial X10 y ha estado en desarrollo desde 1975 [2.2].
- Redes para el hogar y Acceso a Servicios de Internet. Se puede hacer uso de la red de baja tensión para tener una red de área local (LAN) para conectar convenientemente diversos equipos dentro de un mismo edificio. Con las múltiples salidas de tomacorriente en cada habitación, se puede tener una red generalizada y extensa de servicios de comunicación; con la infraestructura eléctrica existente se pueden proporcionar capacidades de red de datos de alta velocidad. En primer lugar, no hay necesidad de recableado costoso; en segundo lugar, casi todos los dispositivos que deben conectarse en red ya están conectados al cableado de AC. Por lo tanto, la creación de redes domésticas puede ser tan simple como conectar los dispositivos a la toma de corriente [2.2].

El mercado de PLC para los consumidores es, por lo tanto, doble: la casa, o el acceso de "última milla", y en el hogar, o el acceso de "última pulgada". El desarrollo del "último centímetro" de las compañías de redes para el hogar en los adaptadores de red inalámbrico y adaptador en líneas de alimentación está conduciendo gradualmente a redes extendidas dentro de los hogares, es decir, una amplia gama de dispositivos conectados en el interior de la casa [2.2].

Sin embargo, aún esta tecnología presenta algunos problemas que dificultan la aplicación y la utilidad de PLC, por lo que una alternativa posible es utilizar PLC como una red de

retorno para las comunicaciones inalámbricas, por ejemplo para conectar puntos de acceso de Wi-Fi o estaciones base de telefonía celular en los postes de utilidad, permitiendo así que los usuarios finales dentro de un cierto rango puedan conectar sus equipos. En un futuro próximo, BPL también puede ser utilizado como un *backhaul* para redes WiMAX [2.2].

Las últimas investigaciones realizadas han logrado altas transmisiones de velocidad utilizando las frecuencias de microondas transmitidas a través de un mecanismo de propagación de onda de superficie recién descubierto llamado E-Line, se ha demostrado que utilizando únicamente un solo conductor eléctrico se pueden transmitir señales digitales de ida y vuelta, es decir, se ha logrado el potencial para la comunicación dúplex completa simétrica y muy por encima de 1 [Gbit/s] en cada dirección [2.2].

- Banda Estrecha PLC y Radio Broadcasting. PLC ha sido utilizado ampliamente para la transmisión de radio en Alemania (Drahtfunk), Suiza (Telefonrundspruch), Noruega (Linjesender), la URSS y otros países. En todos los casos, el programa de radio fue alimentado por transformadores especiales, a través de las líneas. Con el fin de evitar la propagación incontrolada, filtros para las frecuencias portadoras de los sistemas PLC fueron instalados en las subestaciones y en las sucursales de línea [2.2].
- Automóviles. PLC permite dentro de un vehículo una comunicación de red de datos, voz, música y señales de vídeo por medios digitales montados sobre la corriente directa (DC) de la batería del automóvil. Técnicas avanzadas de comunicación digital han sido adaptadas para superar el ambiente hostil y ruidoso de los automóviles. Una línea de alimentación puede ser utilizado para múltiples redes independientes. Los prototipos realizados son un éxito operacional en automóviles que utilizan protocolos compatibles tales como CAN-bus, LIN-bus mediante línea de energía (DC-LIN) y DC-bus desarrollados por el investigador Yamar. Aplicaciones de automoción se incluyen, por ejemplo, control de temperatura, módulos de puertas, los inmovilizadores, detectores de obstáculos y multimedia [2.2].
- Lecturas sobre aplicaciones específicas. La demanda de sistemas domóticos y/o casas inteligentes ha impulsado mucho la investigación. El investigador Çavdar ha presentado una solución para la detección remota de uso de electricidad ilegal. La calidad de la energía también se puede medir haciendo uso de la tecnología PLC [2.2].

## 1.5 Referencias

- [2.1] Sutterlin Phil, "A Power Line Communication Tutorial - Challenges and Technologies", IEEE, International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), pp.1.
- [2.2] Yousuf M. Salman, El-Shafei Mustafa, "Power Line Communications: An Overview – Part I", IEEE, pp.1.

- [2.3] Catoira Fernando, Fullana Pablo, Maidana Melisa, "Power Line Communications, descripción, características y funcionamiento", pp. 17, 18,19, Universidad Nacional del Sur, Argentina 2010.
- [2.4] Müller C., Lewandowski C. and Wietfeld C., Kellerbauer H. and Hirsch H., "Coexistence Analysis of Access and Indoor Powerline Communication Systems for Smart Grid ICT Networks", IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2012.
- [2.5] DS2, "PLC Technology, PLC Standarization Tutorial", DS2 IEEE 802, Orlando, marzo 2004.
- [2.6] J. Sanz, "Los PLC de 1000 Mbps son una realidad", ADLS ZONE, 2012.
- [2.7] González P. J.R., García V. F.J., "La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información de Red.es" Boletín Red Iris No. 68-69, 2004.
- [2.8] Jee George, Edison Con, Ram Das Rao y Cern Yehuda, Ambient Corporation, "Demonstration of the Technical Viability of PLC Systems of Medium and Low Voltage Lines in the United States", IEEE Magazine, Mayo 2003.
- [2.9] Anatory J., Theethayi N., "Broadband Power Line Communication Systems, Theory and Applications" pp.129, 130, 132, 133,134, 135, 136, WIT Press, Gran Bretaña 2010.
- [2.10] The International Engineering Consortium. OFDM for mobile data communications. WEB Pro Forum Tutorial, pp. 118.
- [2.11] Edfors Ove, Sandell,Jan-Jaap van de Beek Magnus, Landström Daniel, Sjöberg Frank, "An Introduction to Orthogonal Frequency Division Multiplexing", 1996.
- [2.12] Dr. Alcántara S. Rogelio, Sandoval G. J. Domingo García, "Análisis, implementación y evaluación de Algoritmos FFT para el multiplexado OFDM en redes de comunicación inalámbrica WiMax", pp. 17, 18, 19, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2010.
- [2.13] Junestrand Stefan, Passaret Xavier, Vázquez Daniel, "Dómotica y Hogar Digital", pp. 128; Thomson Ediciones Spain, España 2005.
- [2.14] ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2010. SMEs in Standardization: DS2 Case Study <http://www.etsi.org/images/DS2Case.pdf> consultado el 25 de marzo 2013.
- [2.15] Carcelle Cavier, "Powerline Communications in practice" pp. 168, Bristish Library Cataloguing in Publication Data, 2006.
- [2.16] Delgado José Luis, "Redes de Banda Ancha: Power Line Communications", Universidad de la Frontera, Chile, 2009.
- [2.17] Power Line Communications en la CFE, México, enero 2008.

# **CAPÍTULO III**

## **ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN CONDUCTORES CONVENCIONALES Y SUPERCONDUCTORES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

---

### 3.1 Introducción

En el Capítulo II se describió el concepto de la tecnología PLC, dando un panorama de la situación actual de la misma, tomando en cuenta aspectos importantes que permitan su implementación, tales como: el esquema general de funcionamiento, tipos de modulación empleados en la transmisión de señales digitales, ventajas y desventajas, marco normativo y aplicaciones. Observando como principal desventaja en su implementación la atenuación de las señales digitales por pérdidas, debido a las características de los conductores de la línea de transmisión en general.

El objetivo de este capítulo es llevar a cabo el análisis de pérdidas de potencia por unidad de longitud en conductores convencionales y superconductores, presentes en líneas de transmisión eléctricas, haciendo uso de un modelo matemático que describa la curva característica de dichas pérdidas, centrando el análisis en los materiales conductores, siendo estos cobre y aluminio, para posteriormente llevar a cabo un comparativo de los resultados obtenidos con el de un material superconductor; para lo cual, fueron necesarios los parámetros que caracterizan sus propiedades superconductoras, tales como, la temperatura crítica  $T_C$  y corriente crítica  $I_C$ , y de esta manera determinar la viabilidad del uso de superconductores aplicados a la tecnología PLC.

Cuando una corriente pasa a través de un cable conductor, la energía eléctrica es convertida en energía térmica debido a que los electrones chocan con los átomos del conductor. Este efecto de corriente eléctrica es conocido como "efecto de calentamiento de corriente eléctrica" [3.1].

El calentamiento de un conductor por el flujo de una corriente eléctrica a través de él es llamado calentamiento Joule. Este es un proceso irreversible. Si la dirección de corriente en un resistor se invierte, el resistor no sería enfriado [3.1].

Por tanto, el efecto Joule puede describirse como el calor producido en un conductor debido al flujo de corriente en su interior y es proporcional al cuadrado de la corriente, resistencia del conductor y el tiempo durante el cual fluye la corriente.

$$Q = I^2 R t \quad [3.1]$$

Por lo tanto, las pérdidas por efecto Joule en los conductores se deben a la resistencia del conductor al paso de la corriente eléctrica, donde, en corriente continua, dicha resistencia responde a la expresión:

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} \quad [3.2]$$

donde:

$\rho$ : resistividad del conductor a temperatura ambiente

$l$ : longitud de la línea

$S$ : sección transversal del conductor

En corriente alterna la resistencia efectiva se ve modificada por dos factores, el efecto proximidad entre conductores y el efecto piel. Conocidas las pérdidas en la línea, la resistencia efectiva puede ser calculada a partir del valor eficaz de la corriente circulante.

$$R = \frac{\text{Pérdidas de potencia (W)}}{I^2}$$

En concreto, la potencia disipada en un conductor de resistencia  $R$ , por el que circula una corriente alterna de intensidad  $I$  es:

$$P = I^2 R = VI \quad [3.3]$$

Si se requieren reducir las pérdidas de energía, se tienen dos opciones: disminuir la resistencia del conductor que transporta la corriente, o disminuir la intensidad que circula por el mismo.

La primera opción se consigue cambiando el material constructivo de las líneas (esto representa utilizar materiales de mayor conductividad y menor resistencia), o aumentar la sección del conductor, lo que implica un aumento del costo de instalación al aumentar la cantidad de metal a utilizar y ser mayor el peso que tendrían que soportar las torres metálicas o postes de suspensión.

La segunda opción, disminuir la intensidad que circula por el conductor, puede conseguirse aumentando la diferencia de potencial en las líneas de conducción, ya que la potencia que transporta una corriente eléctrica es igual a la tensión por la corriente que circula, de modo que para cierto valor de potencia cuanto mayor sea la tensión, más pequeña será la intensidad, consiguiéndose una disminución de la potencia disipada.

El procedimiento de evaluación, se realiza en el siguiente orden:

Es conocido el modelo matemático que describe las pérdidas de potencia de materiales conductores (cobre y aluminio), para posteriormente haciendo uso de Matlab, se realice un barrido de corrientes, tomando como parámetros constantes la frecuencia, resistividad y área transversal del conductor. Una vez obtenidos los datos, se trazan las curvas de pérdidas por unidad de longitud.

De manera análoga, para el material superconductor, se realiza el mismo método, tomando como parámetros constantes  $T_c$  e  $I_c$ .

Una vez obtenidas estas curvas de pérdidas (cobre, aluminio y superconductor) y analizando su comportamiento, se lleva a cabo un comparativo, que nos indicará si es factible el uso de superconductores para su implementación bajo el concepto de la tecnología PLC y con esto, evitar las pérdidas de potencia en el envío de señales digitales en un medio como la red de distribución de energía eléctrica.

### 3.2 Pérdida de potencia en líneas de transmisión (cables convencionales)

#### Pérdida de Tensión por unidad de longitud en un conductor de cobre

En una línea de transmisión es posible medir la pérdida de tensión de un cable conductor al transportar la energía eléctrica mediante la expresión:

$$e = \rho \frac{l}{A} I_0 \cos \theta + \omega L I_0 l \sin \theta \quad [3.4]$$

donde:

$\rho$ : resistividad del conductor

$l$ : longitud en metros

$A$ : área de sección transversal del conductor

$I_0$ : corriente nominal del sistema de distribución

$\theta$ : ángulo de fase

$\omega$ : frecuencia angular

Ahora despejando la longitud “  $l$  ” de la ecuación anterior se tiene:

$$\frac{e}{l} = \frac{\rho}{A} I_0 \cos \theta + \omega L I_0 \sin \theta$$

Factorizando la corriente “  $I_0$  ”:

$$\frac{e}{l} = I_0 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Ahora multiplicando y dividiendo la expresión anterior por la corriente crítica del superconductor “  $I_c$  ”

$$\frac{e}{l} = I_0 \left[ \frac{I_c}{I_c} \right] \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Para emplear una notación uniforme, se propone:

$$x = \frac{I_0}{I_c} \quad [3.5]$$

Por lo tanto, la pérdida de tensión se puede expresar como:

$$\frac{e}{l} = x I_c \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Para obtener la pérdida de potencia por unidad de longitud se tiene:

$$P = eI$$

Sustituyendo la caída de tensión en la ecuación anterior:

$$\frac{P}{l} = eI_0 = xI_cI_0 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Dejando la expresión anterior en términos de  $I_c$  y sabiendo que  $I_0 = xI_c$

$$\frac{P}{l} = xI_c[xI_c] \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right] = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

De esta forma se obtiene la ecuación final para el cálculo de las pérdidas de potencia por unidad de longitud:

$$\frac{P}{l} = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Considerando una línea monofásica como se muestra en la Figura 3.1 y considerando la distancia  $D$  que es la distancia entre los conductores,  $D \gg r_1, r_2$  y además que la corriente de distribución es uniforme a lo largo de la trayectoria, es conveniente conocer la Inductancia total presente en el conductor de distribución necesaria para considerar las pérdidas de potencia, esta se puede expresar como la suma de la inductancia externa y la inductancia interna del conductor, esto es:

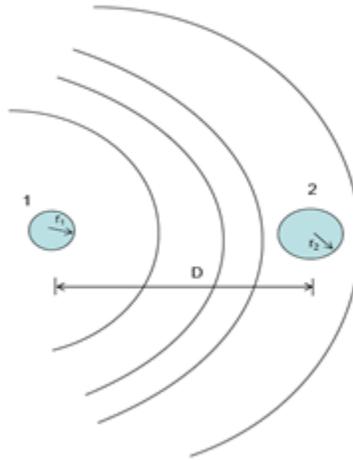


Figura 3.1 Inductancia de una línea monofásica

La inductancia externa en el conductor de cobre está dada como:

$$L_{EXT} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

Donde  $D$  es la distancia que existe entre los conductores y  $r_1$  es el radio del conductor.

La inductancia interna en el conductor de cobre está dada como:

$$L_{INT} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

De esta manera la inductancia total está dada como:

$$L_{TOTAL} = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r_1} \right) \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

Considerando que la distancia entre los conductores es de 3 metros y con un radio de 5.8 [mm].

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$L_{TOTAL} = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{3}{0.0058} \right) \times 10^{-7} = 1.299701 \left[ \frac{\mu H}{m} \right]$$

Para obtener el cálculo de pérdidas se propone un conductor de cobre con las siguientes características:

Tensión máxima de operación: 25 [KV]

Calibre AWG o KCMIL: 3/0

Área nominal de la sección transversal: 85.01 [mm<sup>2</sup>]

Diámetro del conductor: 11.6 [mm]

### **Pérdida de Tensión por unidad de longitud en un conductor de aluminio**

Al igual que en un conductor de cobre, la caída de tensión estará dada por la expresión:

$$e = \rho \frac{l}{A} I_0 \cos \theta + \omega L I_0 l \sin \theta \quad [3.4]$$

donde:

$\rho$ : resistividad del conductor

$l$ : longitud en metros

$A$ : área de sección transversal del conductor

$I_0$ : corriente nominal del sistema de distribución

$\theta$ : ángulo de fase

$\omega$ : frecuencia angular

Ahora despejando la longitud “  $l$  ” de la ecuación anterior se tiene:

$$\frac{e}{l} = \frac{\rho}{A} I_0 \cos \theta + \omega L I_0 \sin \theta$$

Factorizando la corriente “  $I_0$  ”:

$$\frac{e}{l} = I_0 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Ahora multiplicando y dividiendo la expresión anterior por la corriente crítica del superconductor “  $I_c$  ”

$$\frac{e}{l} = I_0 \left[ \frac{I_c}{I_c} \right] \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Para emplear una notación uniforme, se propone:

$$x = \frac{I_0}{I_c} \quad [3.5]$$

Por lo tanto pérdida de tensión se puede expresar como:

$$\frac{e}{l} = x I_c \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Para obtener la pérdida de potencia por unidad de longitud se tiene:

$$P = eI$$

Sustituyendo la caída de tensión en la ecuación anterior:

$$\frac{P}{l} = eI_0 = xI_c I_0 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

Dejando la expresión anterior en términos de  $I_c$  y sabiendo que  $I_0 = xI_c$

$$\frac{P}{l} = xI_c [xI_c] \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right] = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

De esta forma se obtiene la ecuación final para el cálculo de las pérdidas de potencia por unidad de longitud:

$$\frac{P}{l} = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

La inductancia externa en el conductor de aluminio está dada como:

$$L_{EXT} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

La inductancia interna en el conductor de aluminio está dada como:

$$L_{INT} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

De esta manera la inductancia total está dada como:

$$L_{TOTAL} = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r_1} \right) \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad [3.6]$$

Considerando que la distancia entre los conductores es 3 metros y con un radio del conductor de 7.75 [mm], sustituyendo los valores se obtiene:

$$L_{TOTAL} = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{3}{0.00775} \right) \times 10^{-7} = 1.241 \left[ \frac{\mu H}{m} \right]$$

Para el conductor de Aluminio se tienen los siguientes datos:

Tensión máxima de operación: 25 KV

Tensión de distribución propuesta: 23 KV

Calibre AWG o KCMIL: 300

Área nominal de la sección transversal: 152 mm<sup>2</sup>

Diámetro del conductor: 15.5 mm

Radio del conductor= 7.75 mm

R<sub>o</sub>= 2,82 x 10<sup>-8</sup> Resistividad del aluminio

NOTA: SE HARÁ PARA OTRO CALIBRE YA QUE SON MISMOS DATOS QUE EL COBRE.

### 3.3 Pérdida de potencia en líneas de transmisión (cables superconductores)

#### Cálculo de pérdidas por unidad de longitud para un Superconductor

Para obtener la pérdida de potencia por unidad de longitud en un cable superconductor, dentro de la zona de distribución de un sistema eléctrico de potencia, se utilizó la siguiente expresión para posteriormente analizar puntualmente dichas pérdidas mediante MATLAB.

$$\frac{P}{l} = \frac{\omega \mu_0 I_c^2 g(x)}{2\pi^2} \left[ \frac{Watts}{m} \right] \quad [3.7]$$

Donde:

P: pérdida de potencia en el sistema de distribución

l: longitud de un segmento de línea en metros

ω: frecuencia angular

$\mu_0$ : permeabilidad magnética del vacío

$I_C$ : corriente crítica del superconductor

$I_0$ : corriente nominal del sistema de distribución

$x = \frac{I_0}{I_C} \rightarrow g(x) = (1-x)\ln(1-x) + (1+x)\ln(1+x) - x^2$ : Expresión de Norris [3.7].

### 3.4 Comparativo de pérdida de potencia entre cables convencionales y superconductores

Una vez que se obtienen los cálculos de pérdidas por unidad de longitud, las gráficas de resultados fueron las siguientes:

```
>>plot(x,P1,'R-',x,P2,'B-',x,P3,'G-') %Comparando cable superconductor,  
de cobre y aluminio  
  
>>xlabel('I0/IC')  
  
>>ylabel('P/l')  
  
>>gtext('COMPARACIÓN ENTRE UN SUPERCONDUCTOR, CONDUCTOR DE COBRE Y  
CONDUCTOR DE ALUMINIO')
```

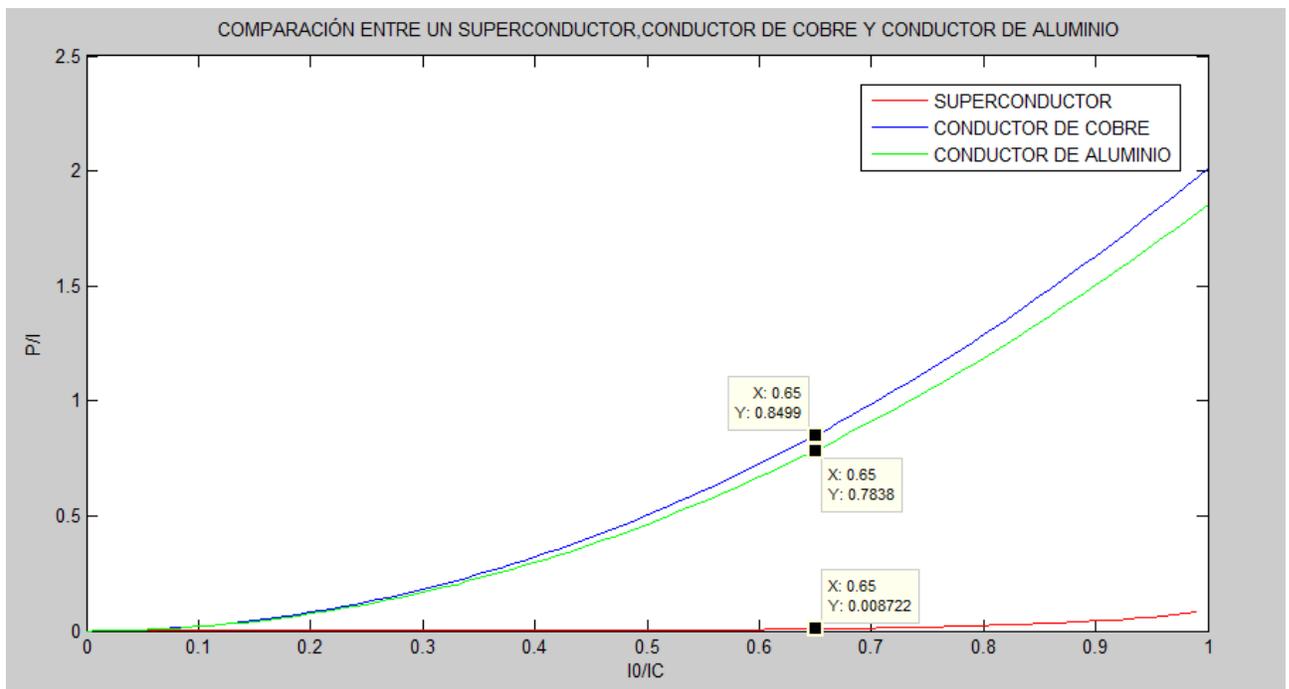


Figura 3.2 Comparación de pérdidas de potencia por unidad de longitud entre un superconductor, conductor de cobre y conductor de aluminio. Se observa que en la relación de corrientes  $\frac{I_0}{I_C}$ , a partir de 0.1 (equivalente a 10 [A]), la diferencia de pérdidas se hace notoria.

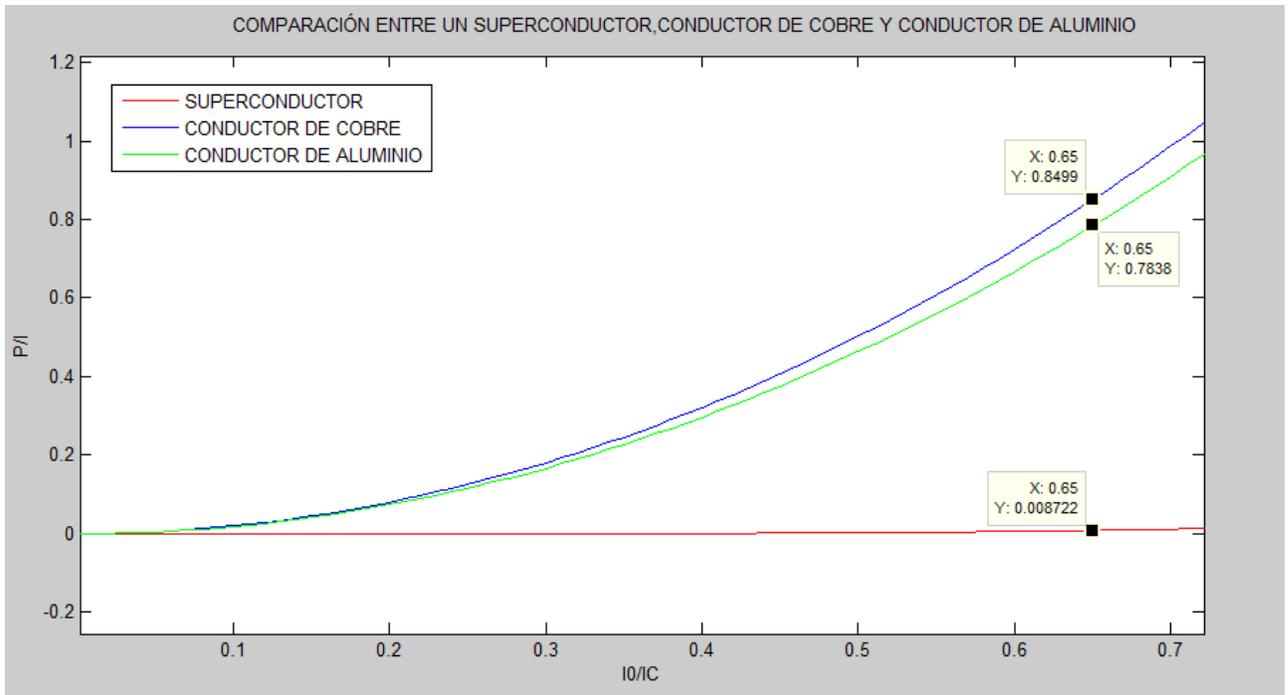


Figura 3.3 Acercamiento de las curvas obtenidas de la Figura 3.2.

Tomando en cuenta un valor arbitrario de corriente (65 [A]) cercano a la corriente crítica  $I_C$ , se observa que en conductores convencionales se tiene una pérdida de 849.9 [Watts] y 783.8 [Watts] para cobre y aluminio respectivamente, mientras que para un superconductor la pérdida es de 8.722 [Watts].

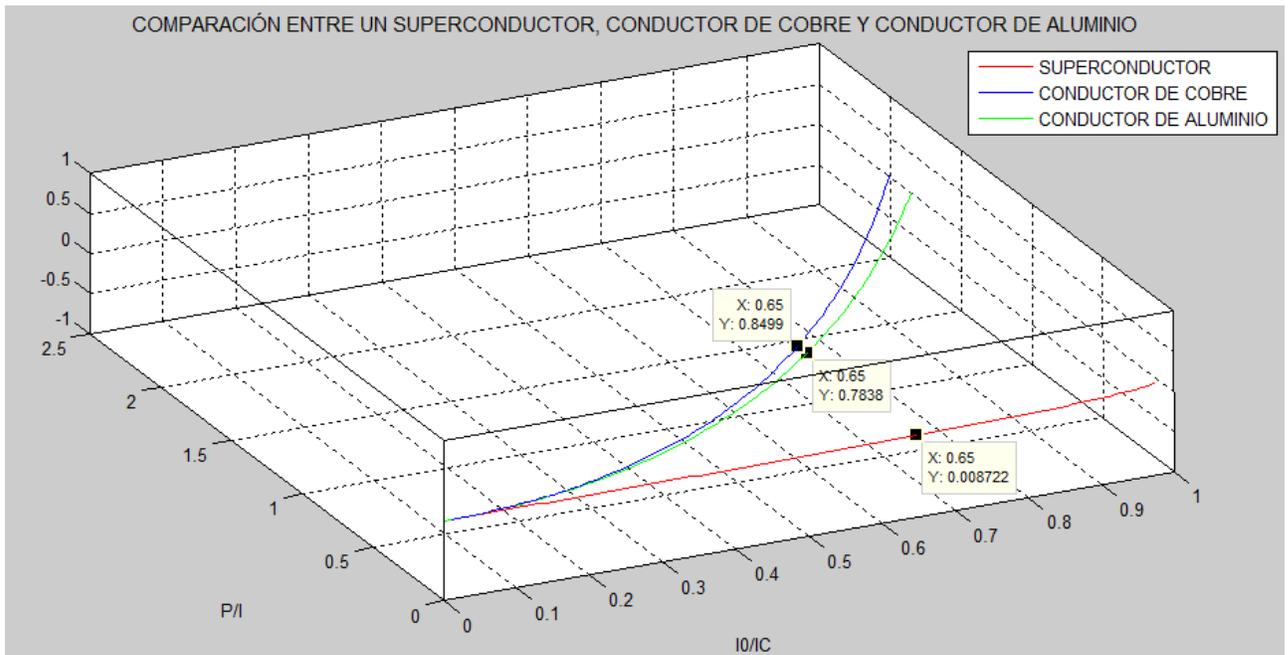


Figura 3.4 Comparación entre un superconductor, conductor de cobre y conductor de aluminio, desde otra perspectiva.

### Comparación de pérdidas por unidad de longitud de un conductor de cobre y un conductor de aluminio

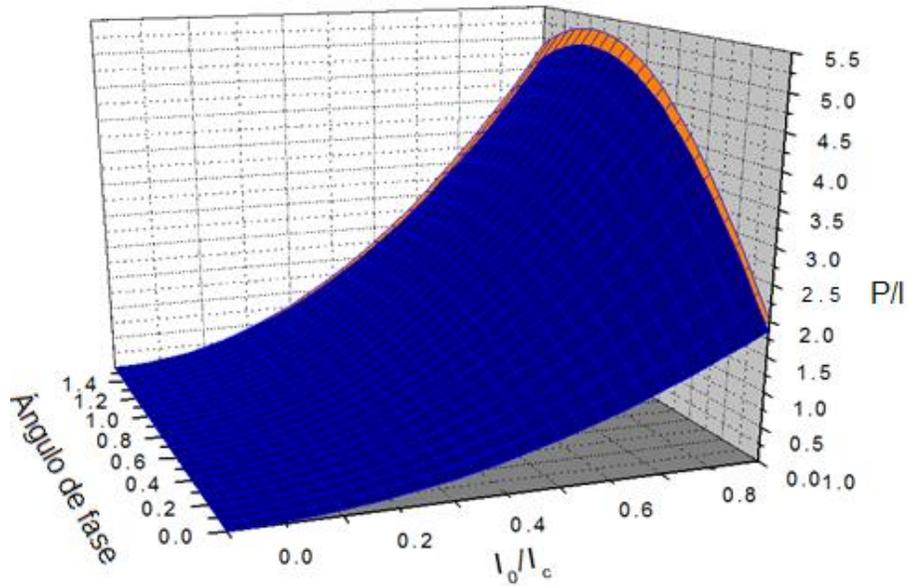
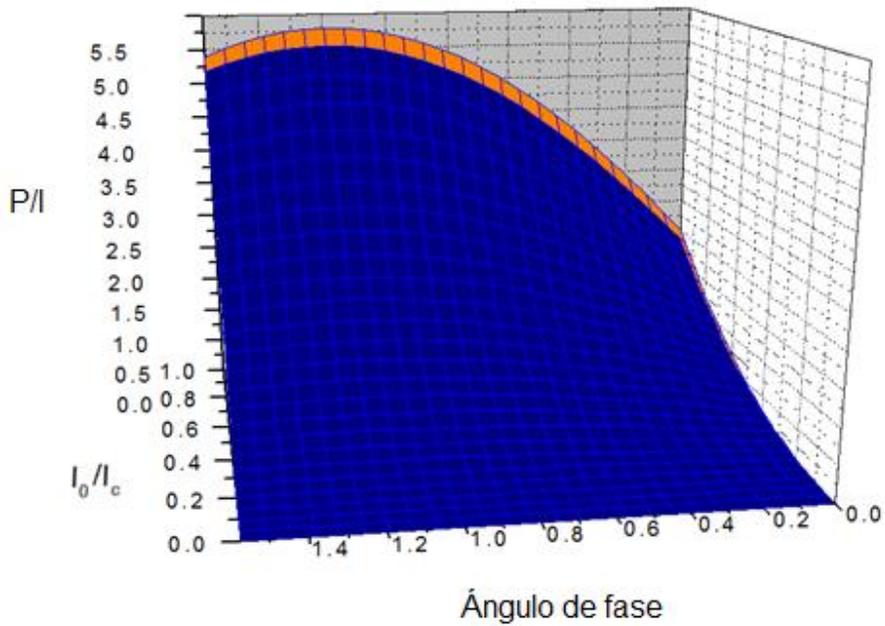
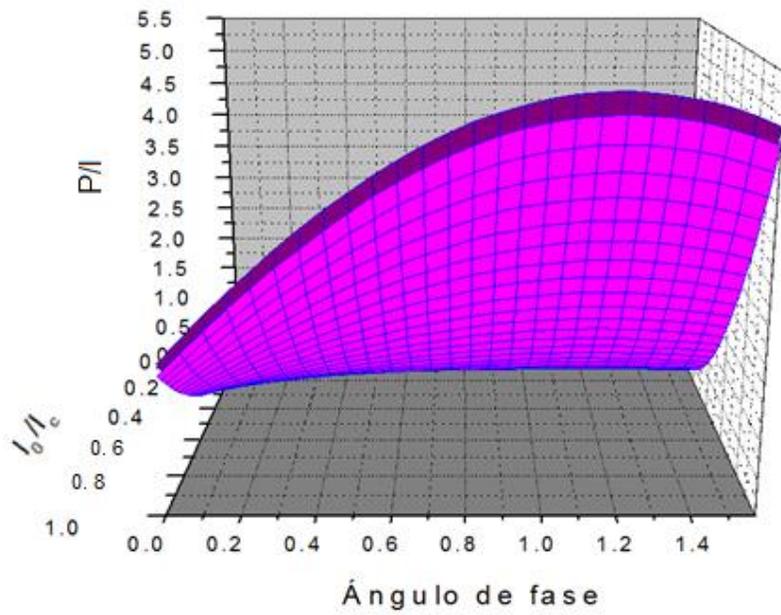
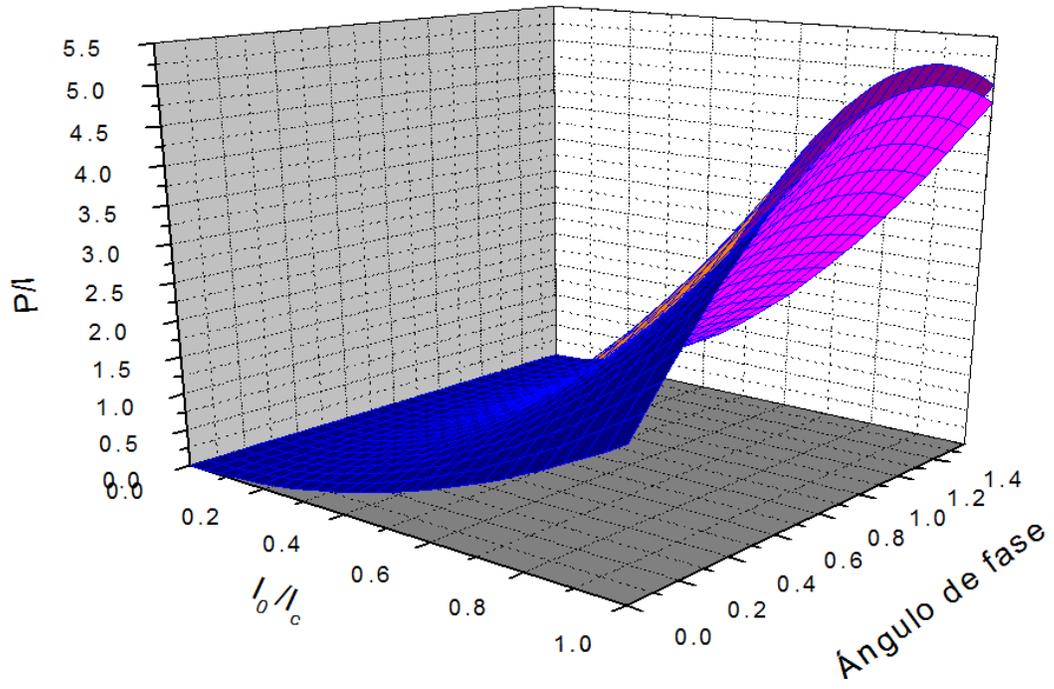


Figura 3.5 Comparación de pérdidas de potencia por unidad de longitud entre conductores convencionales (cobre y aluminio).

Para una corriente de 65 [A], la diferencia de pérdidas de potencia entre dichos conductores es de 66.1 [Watts].





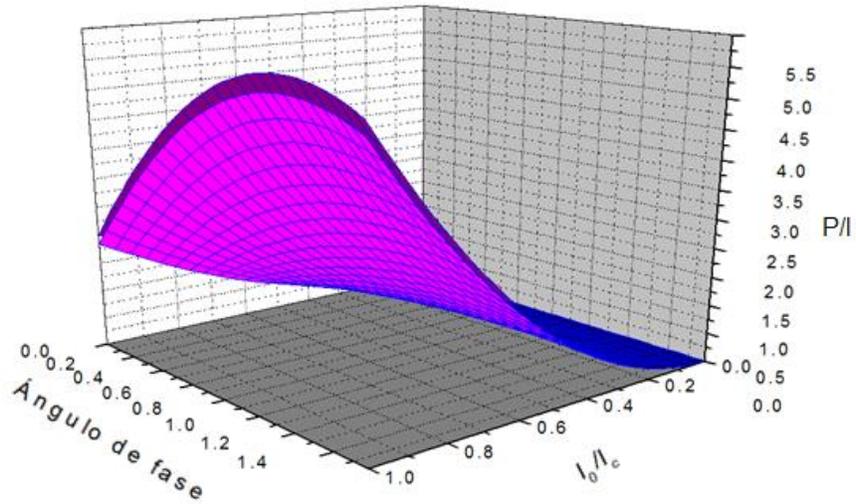


Figura 3.6 Comparación de pérdidas por unidad de longitud entre conductores convencionales (cobre y aluminio) desde múltiples perspectivas.

**Comparación de pérdidas por unidad de longitud de un conductor de cobre, un conductor de aluminio y un superconductor**

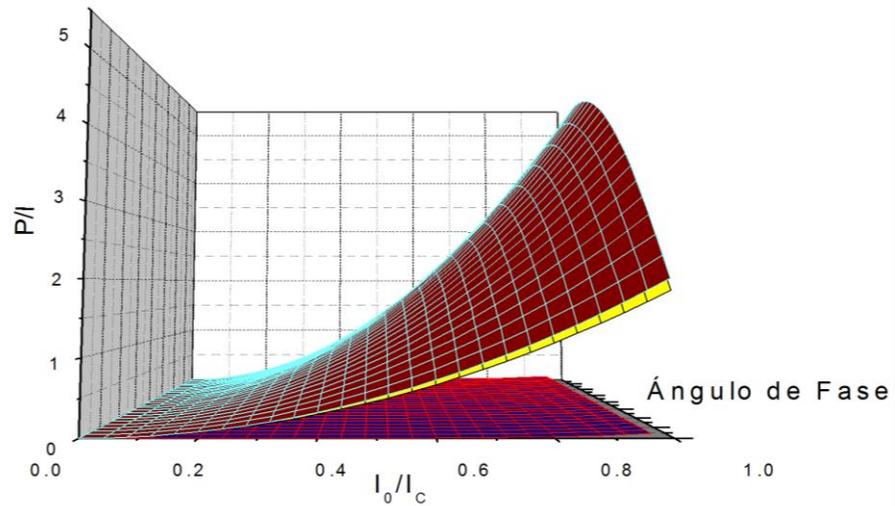
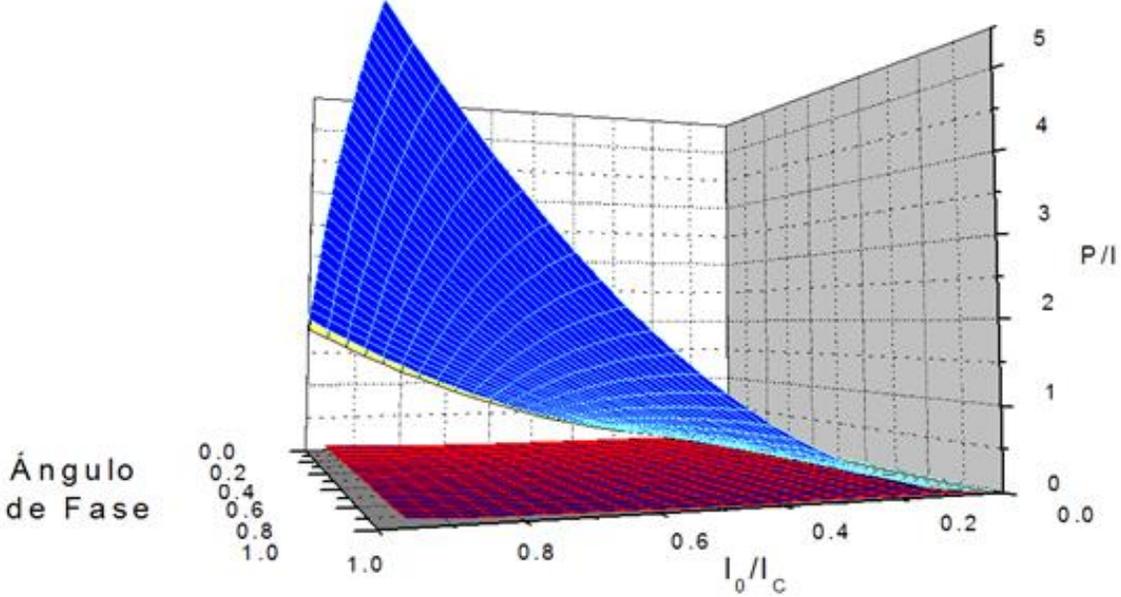
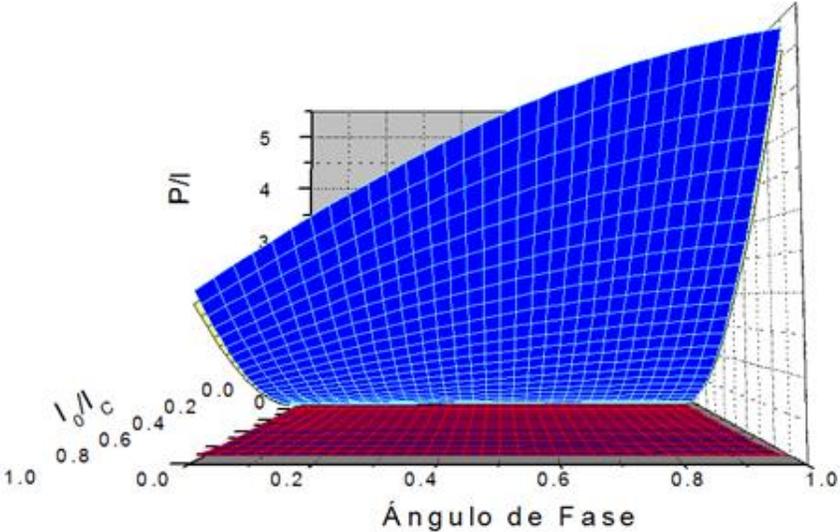


Figura 3.7 Comparación de pérdidas de potencia por unidad de longitud entre conductores convencionales (cobre y aluminio) y un superconductor.

Para una corriente de 65 [A], la diferencia de pérdidas de potencia entre un conductor de cobre y un superconductor es de 841.178 [Watts]. Mientras que la diferencia de pérdidas de potencia entre un conductor de aluminio y un superconductor es de 775.078 [Watts].



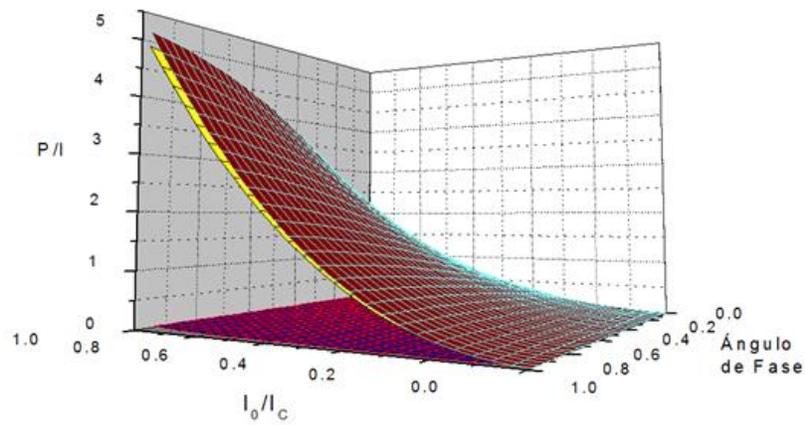


Figura 3.8 Comparación de pérdidas de potencia por unidad de longitud entre conductores convencionales (cobre y aluminio) y un superconductor desde múltiples perspectivas.

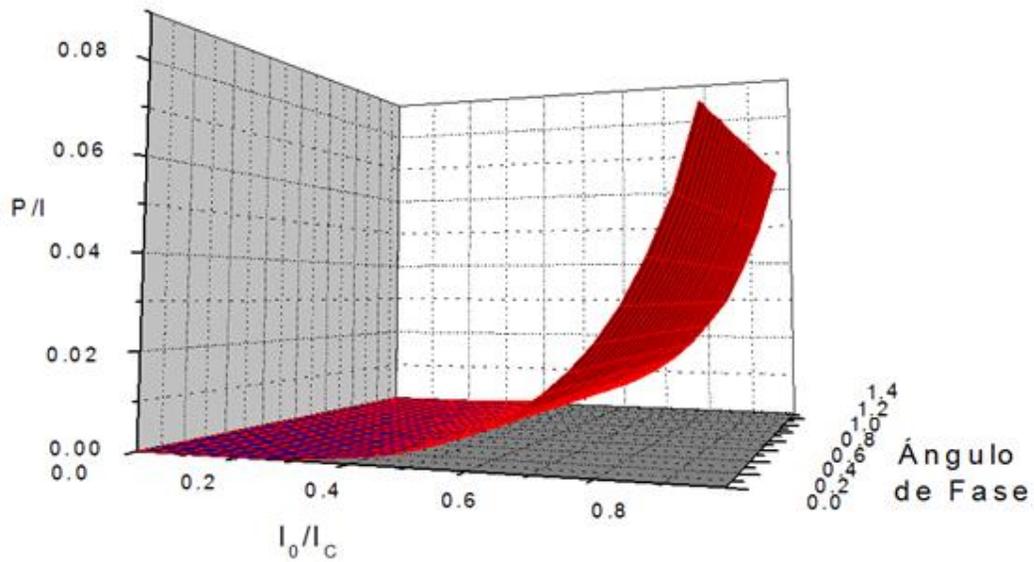


Figura 3.9 Pérdidas de potencia por unidad de longitud de un superconductor.

De las gráficas se observa que el uso de un superconductor es una opción en la transmisión de energía, ya que sus pérdidas son mínimas en comparación con las de un conductor convencional.

### 3.5 Referencias

- [3.1] Kumar Narinder, "Comprehensive Physics, pp. 437, LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD, New Delhi.
- [3.2] Aladro C. José, "Análisis de Sistema de Energía Eléctrica", pp. 358, Servicio de Publicaciones. Universidad de Oviedo.
- [3.3] Mujal R. Ramón M., "Tecnología Eléctrica", pp. 28, Editions UPC, Cataluña 2000.
- [3.4] Zoppetti J. Gaudencio, "Redes eléctricas de alta y baja tensión, para conducir y distribuir la energía eléctrica", 6ta. Edición", pp. 200, 201, Ediciones G. GILI, México, D.F., 1981
- [3.5] Norris W.T., J. Phys. D3, 489 (1970).
- [3.6] Stevenson D. William Jr., "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia 2da. Ed.", pp. 35, Ediciones del Castillo, S.A., Madrid, 1965.
- [3.7] Däumling M., Olsen S. Krüger, Træholt C., Willén D. W. A., Kühle A., Rasmussen C. N., Rasmussen C., Tønnesen O., Østergaard J., "Ac loss in superconducting power cables" pp. 5, published in Vol. 33 of Studies of High Temperature Superconductors (A. Narlikar, ed.), pp. 73, Nova Science Publishers (2000).

# CONCLUSIÓN

---

---

En este trabajo primero se realizó una revisión de la información relacionada con los Sistemas Eléctricos de Potencia para contextualizar el ámbito de aplicación de la tecnología PLC y posteriormente se dieron a conocer sus características, funcionamiento, esquema general, normatividad, así como las ventajas y desventajas de dicha tecnología. Este último punto es de nuestro interés, ya que la principal desventaja que se encontró en esta tecnología es el hecho de que para llevar a cabo su implementación es necesario acondicionar las líneas de transmisión de energía eléctrica, ya que estas presentan pérdidas a lo largo de las redes de transmisión y distribución en conductores convencionales. Dichas pérdidas están dadas por las propiedades inherentes de los materiales empleados en su construcción, ya sean aluminio o cobre, así como la longitud del cableado. Tomando en cuenta esto, optamos por conocer las características y parámetros de los materiales superconductores que maximizan la transmisión de energía. Una vez realizado un análisis comparativo de la pérdida de potencia con la distancia entre conductores y superconductores, se observó que los superconductores presentar un mejor comportamiento en la transmisión de energía, es decir, las pérdidas eléctricas se reducen a un valor cercano a cero, lo que da pauta para determinar un posible uso de cables superconductores en la implementación de la tecnología PLC.

Para el análisis de pérdidas de potencia por unidad de longitud, se utilizó una expresión matemática que incluye las características físicas del cobre y el aluminio empleados en los cables conductores actuales, como son su resistividad y el área transversal de los conductores. Análogamente, para los cables superconductores se consideraron características físicas como su temperatura crítica  $T_c$  y su corriente crítica  $I_c$ . En ambos casos también se consideró la longitud del cable, que para este análisis, fue de 1000 metros. Se consideró la misma corriente alterna en ambos cálculos y con ayuda de Matlab se obtuvieron las gráficas de pérdidas de potencia por unidad de longitud, observando una diferencia muy notable entre las pérdidas en los conductores de aluminio y cobre con respecto a las pérdidas en el material superconductor. Estos resultados indican que la desventaja de la tecnología PLC, debida a la de atenuación de la señal digital transmitida a través del cableado eléctrico, podría resolverse utilizando materiales superconductores de alta temperatura crítica, logrando así reducir abruptamente las pérdidas y atenuaciones.

# APÉNDICE

---

---

## Código en MATLAB para el cálculo de pérdidas por unidad de longitud en un superconductor

```
>> f=60; %frecuencia en Hertz
>> Ic=100; %corriente crítica del superconductor
>> I0=[0:1:100]; %barrido de corriente nominal del sistema de
distribución
>> a=[0:0.1:pi/200]; %ángulo de fase
>> Ro=1.71e-008; %resistividad del cobre
>> A=8.501e-005; %área de la sección transversal
>> L= 1.299701e-006; %inductancia en la línea de transmisión
>> w= 2*pi*f; %frecuencia angular
x=(I0)/(Ic); %término de la expresión de Norris  $x = \frac{I_0}{I_c}$ 
%Definiendo los términos de la expresión de pérdida de potencia por
unidad de longitud en un conductor de cobre
%
$$\frac{P}{l} = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

>> B= x.^2;
>> C= B*(Ic^2);
>> D= (Ro/A)*cos(a);
>> E= (w*L)*sin(a);
>> P2 = C*(D+E);
>>plot(x,P2)%obtención de la curva de pérdidas por unidad de longitud
>>gtext('PÉRDIDA DE POTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN CABLE DE COBRE
DE DISTRIBUCIÓN')
>>xlabel('I0/IC')
>>ylabel('P/l')

>> f=60; %frecuencia en Hertz
>> m0=4*pi*10^-7; %permeabilidad magnética del vacío
```

```

>>Ic=100;           %corriente crítica del superconductor

>> I0=[0:1:100];   %barrido de corriente nominal del sistema de
distribución

%términos de la expresión de Norris

%  $x = \frac{I_0}{I_c} \rightarrow g(x) = (1-x)\ln(1-x) + (1+x)\ln(1+x) - x^2$ 

>> x=(I0)/(Ic);

>> a=(1-x);

>> b=log(1-x);

>> c=(1+x);

>> d=log(1+x);

>> h=x.^2;

>> n =(a.*b)+(c.*d);

>> g= n-h;

>> C=m0*f;

>> P1= (((C*Ic^2)*g)/pi); %pérdida de potencia por unidad de longitud
en un cable superconductor

>>plot (x,P1)           %obtención de la curva de pérdidas por
unidad de longitud

>>gtext('PÉRDIDA DE POTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN CABLE
SUPERCONDUCTOR')

>>xlabel('I0/IC')

>>ylabel('P/l')

```

## Código en MATLAB para el cálculo de pérdidas por unidad de longitud en un conductor de cobre

```
>> f=60; %frecuencia en Hertz
>> Ic=100; %corriente crítica del superconductor
>> I0=[0:1:100]; %barrido de corriente nominal del sistema de
distribución
>> a=[0:0.1:pi/200]; %ángulo de fase
>> Ro=1.71e-008; %resistividad del cobre
>> A=8.501e-005; %área de la sección transversal
>> L= 1.299701e-006; %inductancia en la línea de transmisión
>> w= 2*pi*f; %frecuencia angular
x=(I0)/(Ic); %término de la expresión de Norris  $x = \frac{I_0}{I_c}$ 
%Definiendo los términos de la expresión de pérdida de potencia por
unidad de longitud en un conductor de cobre
% $\frac{P}{l} = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$ 
>> B= x.^2;
>> C= B*(Ic^2);
>> D= (Ro/A)*cos(a);
>> E= (w*L)*sin(a);
>> P2 = C*(D+E);
>>plot(x,P2)%obtención de la curva de pérdidas por unidad de longitud
>>gtext('PÉRDIDA DE POTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN CABLE DE COBRE
DE DISTRIBUCIÓN')
>>xlabel('I0/IC')
>>ylabel('P/l')
```

## Código en MATLAB para el cálculo de pérdidas por unidad de longitud en un conductor de aluminio

```
>> f=60; %frecuencia en Hertz
>> Ic=100; %corriente crítica del superconductor
>> I0=[0:1:100]; %barrido de corriente nominal del sistema de
distribución
>> a=[0:0.1:pi/200]; %ángulo de fase
>> Ro=1.71e-008; %resistividad del aluminio
>> A=2.82e-008; %área de la sección transversal
>> L= 1.241e-006; %inductancia en la línea de transmisión
>> w= 2*pi*f; %frecuencia angular
x=(I0)/(Ic); %término de la expresión de Norris  $x = \frac{I_0}{I_c}$ 
%Definiendo los términos de la expresión de pérdida de potencia por
unidad de longitud en un conductor de aluminio

$$\frac{P}{l} = x^2 I_c^2 \left[ \frac{\rho}{A} \cos \theta + \omega L \sin \theta \right]$$

>> B= x.^2;
>> C= B*(Ic^2);
>> D= (Ro/A)*cos(a);
>> E= (w*L)*sin(a);
>> P3 = C*(D+E);
>>plot(x,P3)%obtención de la curva de pérdidas por unidad de longitud
>>gtext('PÉRDIDA DE POTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD EN UN CABLE DE
ALUMINIO DE DISTRIBUCIÓN')
>>xlabel('I0/IC')
>>ylabel('P/l')
```