



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

LA SUPERCONDUCTIVIDAD, APLICADA EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

Félix Rolando Paz García

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, julio de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LA SUPERCONDUCTIVIDAD, APLICADA EN LA
TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FÉLIX ROLANDO PAZ GARCÍA

ASESORADO POR EL INGENIERO ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO

GUATEMALA, JULIO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

LA SUPERCONDUCTIVIDAD, APLICADA EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 22 de noviembre de 2005.

Félix Rolando Paz García

ACTO QUE DEDICO A:

LA MADRE NATURALEZA

Por regalarme un instante de vida.

MIS PADRES

Porque aún desde el inmenso dolor del exilio, con sencillez y esfuerzo honrado, poético y científico, montaron de nuevo el corcel de la lucha por la libertad, que para mi presente y futuro, será el luminoso faro que guiará mis propias luchas. Y ahora que los nuevos aires mi vuelo esperan, con alegría y de frente a la vida lanzo mi voz al viento, y enaltezco a mis padres con quienes juntos construimos mi futuro. Las palabras rozan tan sólo el significado de las realidades, y sin más se convierten en lágrimas por los recuerdos y el triunfo. Les he dado sinsabores, y por eso presento mis disculpas, y espero que al igual que mis penas y dolores los hicieran suyos, este triunfo sea de ustedes y no mío. Yo solamente tuve que estudiar. A Carlos Rolando Paz Hernández y Gladys Elizabeth García de Paz, muchas gracias.

MIS HERMANAS

Isabel y Lucía, por brindarme su apoyo, cariño y respeto.

MI FAMILIA

De Totonicapán y de la ciudad Capital, porque siempre estuvieron conmigo. Un agradecimiento especial a mi tío Rodolfo Rolando por su apoyo moral y económico a lo largo de mi carrera.

TODOS LOS HÉROES ANÓNIMOS

Que aún viven y a los que murieron en las calles, veredas y montañas, luchando desde las sombras por construir una Guatemala diferente con luminosidades populares y campesinas; porque su ejemplo de lucha y valentía, también hicieron que llegara a este momento trascendental de mi existencia.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Por haberme cobijado en su historia llena de heroísmos. Jamás la olvidaré.

AGRADEZCO A:

LAS INSTITUCIONES

Laboratorio de Pruebas del INDE, por abrirme sus puertas desinteresadamente; a la Sección Socio Económica del edificio de Bienestar Estudiantil de la USAC, por brindarme apoyo académico y económico; al CEUR, específicamente al Ing. Mario Alfonso Bravo, por sus consejos.

MIS AMIGOS

De la “beca”, por todos los momentos que convivimos; a mis amigos del diario vivir estudiantil y su mano acompañante.

MI MEJOR AMIGA

Que sin la incondicionalidad de su amistad mis perspectivas de una mejor vida serían distintas.

MI ÁNGEL

Que apareció entre mares intranquilos; y sin más esfuerzo que una sonrisa, me rescató de los abismos del miedo y la soledad. Gracias por recordarme que en este mundo todavía existe la esperanza del amor.

MIS MAESTROS DE LOS NIVELES PRIMARIO Y SECUNDARIO

Por abrirme las puertas de la Ciencia.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA	
1.1 Bases legales	1
1.1.1 Ley General de la Electricidad	2
1.1.1.1 Ministerio de Energía y Minas	3
1.1.1.2 Comisión Nacional de Energía Eléctrica	3
1.1.1.3 Administrador del Mercado Mayorista	4
1.2 Sistemas de energía eléctrica	5
1.2.1 El sistema eléctrico	5
1.2.1.1 Sistema de generación	5
1.2.1.2 Sistema de transporte	5
1.2.1.3 Sistema de distribución	6
2. LAS PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL TRANSPORTE DE ENERGÍA	
2.1 Líneas de transmisión	7
2.1.1 Modelo circuital de la línea bifilar ideal	10
2.1.2 Líneas con pérdidas	15

2.1.3	Parámetros de la línea	19
2.1.3.1	Impedancia serie	20
2.1.3.2	Admitancia en derivación	24
2.1.4	Circuito equivalente de una línea	25
2.1.4.1.1	Línea de transmisión corta	25
2.1.4.1.2	Línea de transmisión media	26
2.1.4.1.3	Línea de transmisión larga	28
2.1.4.1.3.1	Forma hiperbólica de las ecuaciones	30
2.1.4.1.3.2	Circuito equivalente	32

3. LOS SUPERCONDUCTORES, UNA ALTERNATIVA

3.1	La superconductividad	35
3.1.1	Historia de la superconductividad	35
3.1.2	Descripción del fenómeno	42
3.1.2.1	Teoría BCS	43
3.1.3	Tipos de superconductores	49
3.1.3.1	Superconductor tipo I	49
3.1.3.2	Superconductor tipo II	50
3.1.4	Propiedades de los superconductores	51
3.1.4.1	Efecto Meissner	51
3.1.4.1.1	Ecuación de London	55
3.1.4.2	La densidad de corriente	59
3.1.4.3	Efecto Josephson	59
3.1.4.3.1	Magnetómetros superconductores	60
3.1.4.4	Efecto de Proximidad	64
3.1.5	Algunas aplicaciones	65
3.1.5.1	El SQUID: dispositivo superconductor de interferencia cuántica	65

3.1.5.2	El RMN: dispositivo de formación de imágenes por resonancia magnética	66
3.1.5.3	Ordenadores	67
3.1.5.4	Campos magnéticos intensos	67
3.1.5.5	Imanes basados en superconductores de alta temperatura	68
3.1.5.6	Cables superconductores	69
3.1.5.7	Limitadores de corriente (superconductores)	72
3.1.5.8	SMES: superconductores magnéticos de almacenamiento de energía	74
3.1.5.9	Investigación espacial	74
4	LA SUPERCONDUCTIVIDAD EN LA ACTUALIDAD	
4.1	Empresas dedicadas a la investigación y manufactura de superconductores	75
4.2	Las experiencias de la empresa ULTERA	
4.2.1	El desarrollo exitoso de un cable conductor HTS de 3.0 kA	76
4.2.1.1	Contenido	76
4.2.1.2	Requerimientos del proyecto AEP	76
4.2.1.3	La exitosa prueba del conductor de 3 Ka	77
4.2.1.4	Las implicaciones de estos resultados	78
4.2.2	Realización de la demostración de un supercable en la subestación de AMK en Copenhague. Una prueba exitosa de dos años en la red pública	79
4.2.2.1	Descripción del proyecto demostrativo	79
4.2.2.1.1	El propósito	79
4.2.2.1.2	Descripción de la instalación	79

4.2.2.1.3	La descripción del cable superconductor	80
4.2.2.1.4	Resultados de dos años de prueba	80
4.2.2.1.4.1	Datos del funcionamiento	80
4.2.2.1.4.2	Experiencias de servicio y reparación	85
4.2.2.1.5	Desmontaje de los supercables	86
4.2.2.1.6	Aprovechamiento de los resultados	87
4.2.3	Cable Triaxial superconductor de potencia	89
4.2.3.1	Diseño del cable Triaxial	89
4.2.4	Comprobación exitosa de un cable de 3 x 3.0 kA Triax HTS	91
4.2.4.1	Contenido	91
4.2.4.2	El equipo de prueba	91
4.2.4.3	Resultados	92
4.2.4.4	Las variaciones rápidas de carga	93
4.2.4.4.1	Transmisión de potencia y voltaje de distribución	94
4.2.4.5	Parámetros técnicos y aplicaciones	95

5 VIABILIDAD DE LA INVERSIÓN EN PROYECTOS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, CON TECNOLOGÍA SUPERCONDUCTORA

5.1	Aplicaciones y sus desventajas	97
5.1.1	Propiedades que se requieren en los superconductores comerciales	101
5.2	Viabilidad de la inversión	102
5.2.1	Presupuesto asignado y ejecutado del INDE	105
5.2.2	Comparación de indicadores entre Guatemala y Dinamarca	107

5.2.2.1	Población	107
5.2.2.2	Población a nivel mundial, respecto a la población bajo el nivel de pobreza	107
5.2.2.3	Posición a nivel mundial respecto al PIB, paridad del poder adquisitivo	107
5.2.2.4	Presupuesto	109
5.2.2.5	Monto de la deuda externa	109
5.3	Conclusión	109

CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Par de electrodos paralelos	7
2. Representación de una línea como una cascada de cuadripolos	8
3. Fuente concentrada en un punto de una línea cargada en ambos extremos	9
4. Modelo circuital de la línea bifilar ideal	10
5. Representación de la inductancia y la capacitancia	11
6. Modelo circuital de un cuadripolo	15
7. Ondas armónicas de igual frecuencia, una ideal y otra real	17
8. Línea de transmisión de tres fases, con un alambre neutro	20
9. Diagrama geométrico de los conductores a y b	21
10. Circuito equivalente de una línea de transmisión corta	25
11. Circuito equivalente de una línea de transmisión media	26
12. Diagrama esquemático de una línea de transmisión larga	28
13. Circuito equivalente de una línea larga	33
14. Físico Heike Kamerlingh Onnes	36
15. Efecto Meissner	36
16. Walter Meissner	36
17. John Bardeen, León Cooper y John Schrieffer	37
18. Brian Josephson	38
19. SQUID	38
20. Alex Müller y Georg Bednorz	39
21. Red de iones en un sólido	44
22. Electrón viajando por una densidad de carga positiva	44

23. Interacción entre dos electrones	45
24. Par de Cooper	45
25. Rango de la interacción por fonones del Par de Cooper	47
26. Comparación entre un superconductor y un conductor normal	48
27. Variación con la temperatura del valor de Δ comparado con su valor a 0 K	48
28. Curvas de imanación superconductor de un superconductor tipo I y tipo II	49
29. Penetración del campo magnético B, en el interior de un material considerado solamente como conductor perfecto (es decir que sólo presenta resistencia eléctrica igual a cero, pero no el efecto Meissner), al pasar por la temperatura de transición	52
30. Penetración del campo magnético, B, en el interior de un material que es un superconductor (es decir, que presenta resistencia eléctrica igual a cero y además el efecto Meissner), al pasar la temperatura de transición	53
31. Amortiguación exponencial	58
32. a) Circuito superconductor, b) Con flujo magnético en su interior y c) Corriente en el dispositivo magnetómetro frente a campo magnético	62
33. SQUID	65
34. RMN	66
35. Tren superconductor	68
36. Tipo de cable superconductor llamado rígido	70
37. Cable superconductor del tipo semiflexible	71
38. Cable superconductor del tipo completamente flexible	72

39. Diseño de un elemento basado en una doble hélice sobre un tubo de material superconductor con el objeto de ser utilizado en un limitador de corriente superconductor	73
40. El cable conductor de 3 kA fabricado y probado en abril-mayo de 2003, usando sólo dos capas de cinta HTS, comparado al mejor conductor de ocho capas de 1999	77
41. Los resultados de un cable conductor de 3 kA HTS hecho de dos capas de cintas de HTS, comparado con los mejores resultados anteriores de un conductor de 2 kA de 1999, donde se usaron ocho capas de cinta HTS	78
42. Las imágenes de los cuatro componentes del sistema de supercable	80
43. Ajustando los ángulos de las cintas de HTS en las 8 capas, la corriente puede estar distribuida con precisión en el cable conductor	81
44. a) Diagrama de la carga eléctrica transportada por el cable HTS en el período del 5-12 mayo, 2003, mostrando las fluctuaciones en la carga durante la semana y el día. b) Diagrama de la entrada y toma de corriente a las temperaturas que operan por encima del período de una semana, mostrando un funcionamiento estable del sistema refrigerante AMK	83
45. Detalle del 6 de mayo que muestra la onda de carga causada por el sistema metropolitano de Copenhague	84
46. Los supercables se desmontaron el 16 de junio de 2003, después de dos semanas de remover el sistema refrigerante, terminales, y equipo de medida. Los tres cables fueron removidos con una diferencia de tres horas	87

47. Se preparan los tres supercables de prueba de Copenhague para el transporte a DTU Oersted, donde pasarán por un procedimiento de prueba de pos-funcionamiento	88
48. El equipo de NKT Cables que realizó el montaje y desmontaje del sistema de demostración de supercables en la subestación de AMK, Copenhague	89
49. Cable superconductor Triaxial de tres fases superconductoras	90
50. Arreglo de las pruebas de ULTERA, con una cámara de presión refrigerada, en la Universidad Técnica de Dinamarca. El equipo de prueba es operado por el científico de investigación de ULTERA, Chresten Traholt	92
51. Perfil actual y respuesta de temperatura en un modelo de cable Triax 3 x 3.0 kA, de tres metros de largo	93
52. Comparación del incremento de la temperatura a la plena carga para un cable de aluminio de 12 kV (calculado) y el supercable Triax (medido)	94
53. Una serie de 12 x 240 mm ² , conductores de tres fases de 12 kV tres-fase comparados al Triax experimental	95
54. Sistemas de Líneas y Subestaciones en Guatemala	103
55. Gráfica Año frente a Porcentaje del Índice de Confiabilidad en Líneas de Transmisión	104
56. Guatemala – Producto Interno Bruto (PIB) (miles de millones)	108
57. Dinamarca – Producto Interno Bruto (PIB) (miles de millones)	108

TABLAS

I.	Propiedades eléctricas de los materiales usados en líneas de transmisión	22
II.	Campo crítico superior para algunos compuestos	50
III.	Rangos del sistema de cables en AMK	81
IV.	Datos de operación del período de prueba de dos años en AMK, Copenhague	85
V.	Estadísticas de servicio y alarmas en el período de prueba de dos años en AMK, Copenhague	86
VI.	Comparación de propiedades entre un cable Triax de 3 kA, 12 kV y una serie de cables de 12 x 3 x 240mm ² de Aluminio	96
VII.	Perspectivas económicas de las aplicaciones de la superconductividad a escala mundial (en millones de €)	99
VIII.	Índices de confiabilidad de la red de transporte	104
IX.	Ejecución presupuestaria 2000-2004 del INDE	106

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentaje
Mw	Megawatt
kv	Kilovoltio
λ	Longitud de onda
σ	Conductividad
∞	Infinito
L	Inductancia
C	Capacitancia
Z	Impedancia
Y	Admitancia
Ω	Ohm
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
m	Metro
km	Kilómetro
$^{\circ}\text{K}$	Grado kelvin
Tc	Temperatura crítica
mm	Milímetro
Å	Angstrom
Bc	Campo magnético crítico
λ_L	Profundidad de penetración
Wb	Weber
km/h	Kilómetro por hora

cm	Centímetro
W/m	Watts por metro
rms	Raíz media cuadrática
kA	Kiloamperio
A	Amperio
Hz	Hertz
MVA	Mega volt-amperio
GWh	Giga watt-hora
kg/m	Kilogramo por metro
\$	Signo de dólares
€	Signo de euros
Q	Signo de quetzales

GLOSARIO

Superconductividad	Al enfriar ciertos metales y aleaciones por debajo de una temperatura crítica (T_c), del orden de algunos °K, se observa la desaparición repentina de la resistividad eléctrica. Este fenómeno sorprendente se denomina superconductividad.
Línea de transmisión	Es un dispositivo que se usa para transportar energía electromagnética y/o información de un sitio a otro.
Ley General de Electricidad	Determina con claridad los aspectos asociados a la rectoría, la facilitación, la regulación y la coordinación comercial de las actividades del subsector eléctrico.
CNEE	Organismo técnico del Ministerio de Energía y Minas, con independencia funcional, encargado de formular, implantar y fiscalizar el marco regulatorio y normativo, que define las reglas del juego del desarrollo de las actividades del subsector eléctrico, y la actuación de los agentes económicos que intervienen en el mismo.

AMM

Entidad privada sin fines de lucro, que coordina las transacciones entre los participantes del Mercado Mayorista.

Teoría BCS

La teoría BCS muestra que, en ciertas condiciones, la atracción entre electrones debida a un intercambio de fonones puede exceder ligeramente a la repulsión coulombiana. Los electrones se mantienen unidos débilmente y formarán el llamado Par de Cooper (elementos responsables de la superconductividad).

Efecto Meissner

Un superconductor se comporta de manera tal, que nunca permite que un campo magnético penetre en su interior. Es decir, que un superconductor es un diamagnético perfecto.

Efecto de Proximidad

Consiste en que la propiedades superconductoras de la películas metálicas pueden verse seriamente afectadas por el contacto directo con otros metales.

RESUMEN

La superconductividad, fenómeno sorprendente que fue observado por primera vez por el holandés *Kamerlingh Onnes* en 1911, quien encontró que la resistencia del mercurio se acercaba a cero luego de que su temperatura se acercara a los 0 °K. Ésto dio paso a un sinfín de descubrimientos en diversos materiales con temperatura extremadamente frías.

Interesantes fenómenos como el *Meissner-Ochsenfeld* que lleva el nombre de los investigadores alemanes *Walter Meissner y Robert Ochsenfeld*, amplían el campo de aplicación, no sólo reduciendo a cero la resistencia eléctrica sino también reduciendo a cero la resistencia mecánica (trenes levitantes).

Existen varias teorías que explican el fenómeno superconductor, con algunas deficiencias que actualmente están en revisión. La teoría BCS, propuesta por *Bardeen, Cooper y Schrieffer* en 1957 es una de ellas. Esta teoría explica el porqué en un material superconductor la resistencia se reduce a cero, demostrándolo con la interacción entre electrón-fonón-electrón (Pares de Cooper).

Las aplicaciones de esta tecnología son ilimitadas. Actualmente se construyen los equipos de resonancia magnética, comunes en hospitales, con superconductores. En el campo del alto voltaje, ya se construyen cables capaces de portar miles de veces más amperaje que las actuales líneas de transmisión. Cables que agrupan las tres fases en capas sobre un eje común. Trenes levitantes que alcanzan velocidades de hasta 500 km. por hora, demuestran la revolución industrial que se avecina con esta tecnología.

Sin embargo, debido a que los costos actuales son demasiado elevados, la necesidad de seguir investigando sobre nuevos materiales capaces de pasar al estado superconductor en una temperatura ambiente, es de sumo interés a nivel mundial, pues esto reduciría los gastos considerablemente. Mientras tanto, Guatemala tendría que esperar esos avances y aprovechar las oportunidades venideras en este interesante y amplio campo de la superconductividad, aunque no se puede descartar la posibilidad que entre el gobierno y el llamado sector privado, inicien investigaciones, porque al fin y al cabo, la superconductividad beneficiaría principalmente a estos dos entes de la sociedad guatemalteca.

OBJETIVOS

General

Dar a conocer la potencialidad de la tecnología superconductor, y plantear la posibilidad de su aplicación futura en la transmisión de energía eléctrica en Guatemala.

Específicos

1. Motivar la elaboración de programas académicos de largo plazo por parte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para el conocimiento técnico-científico de la superconductividad.
2. Ejemplificar la eficiencia de los superconductores con experiencias exitosas de otros países.
3. Promover el conocimiento general empírico de la superconductividad en diferentes sectores no académicos de la población guatemalteca.

INTRODUCCIÓN

El acelerado avance tecnológico que se observa actualmente en el mundo, y las múltiples aplicaciones que posibilitan, motiva el planteamiento de proyectos, al menos exploratorios, para una posible y futura implementación de equipo y materiales, cada vez mejores en el campo de la electricidad que, sin duda, haría más barata y eficiente la prestación de este servicio público.

Pero no se trata de hacer un planteamiento tecnologista, porque ello sólo favorece a los sectores dominantes, sino de un planteamiento de carácter social. Y con ello planteo que la “tecnología moderna” se ponga al servicio de toda la sociedad, sin privilegios sectoriales.

La superconductividad, tema del presente trabajo de graduación, puede llegar a ser en el futuro, una solución duradera para diferentes problemas que enfrenta actualmente el sector eléctrico en Guatemala, y puede ponerse al servicio de toda la colectividad. Esta área eléctrica ha ido despertando interés en diversas partes del mundo, con un exitoso plan piloto de aplicación en Dinamarca que, salvando las diferencias, puede tomarse como ejemplo del uso de tecnología de punta al servicio de toda la comunidad.

En Guatemala se requiere que la Universidad de San Carlos de Guatemala y el Gobierno, en alianza con el llamado sector privado inicien los estudios correspondientes para verificar la posible aplicación futura de la superconductividad si no quieren grandes problemas en este sector a largo plazo. Se requiere de buena voluntad política y amor por Guatemala para ello.

El Gobierno y el llamado sector privado, deben saber que la superconductividad puede mejorar y modernizar la infraestructura eléctrica nacional, pues en la generación, distribución y transmisión del fluido eléctrico implica reducción de pérdidas en su manejo.

Aplicar la superconductividad en la transmisión de energía eléctrica, pareciera imposible en Guatemala; sin embargo, en varios países se construyen y manufacturan superconductores para altos voltajes, y en algunos de ellos ya se realizaron las primeras actualizaciones con esta tecnología. Entonces, ¿por qué no en Guatemala?

En el presente trabajo, se pretende introducir a los interesados al fascinante mundo de la superconductividad, a pesar del escasísimo material bibliográfico existente en nuestro país, y a las pocas experiencias prácticas que se desarrollan en el mundo. Y es necesario que sea así, pues en Guatemala son pocos los profesionales que tienen algún conocimiento sobre esta área específica de la electricidad. Y por otro lado, jamás se ha escuchado que el Gobierno y el llamado sector privado estén interesados en el tema. De ahí su carácter introductorio y descriptivo.

Se presenta a continuación, pues, y de manera descriptiva (pues no es posible de otra manera) la superconductividad y, al final, se hacen algunas valoraciones personales junto con un análisis comparativo entre el uso de la superconductividad en Dinamarca y su posible implementación en Guatemala.

¡Ojalá y el futuro no nos deje atrás!

1. LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

1.1 Bases Legales

A continuación se presenta un listado de las normas jurídicas fundamentales que norman el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de la electricidad en Guatemala¹:

- a) Constitución Política de la República.
- b) Ley General de Electricidad, Decreto No 93-96 y su Reglamento (Acuerdo Gubernativo No 256-97).
- c) Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (Acuerdo Gubernativo No. 299-98).
- d) Normas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, siendo estas las siguientes:
 - 1. Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD).
 - 2. Normas de Estudio de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NEAST).
 - 3. Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT).
 - 4. Normas de Seguridad de Presas.
 - 5. Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDROID).

¹ Guía del Subsector Eléctrico, Marco Regulatorio del Subsector Eléctrico, Ministerio de Energía y Minas.

6. Norma Técnicas de Diseño y Operación del Sistema de Transporte (NTDOST).
 7. Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS).
- e) Normativas emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista, siendo estas:
1. Normas de Coordinación Operativa.
 2. Normas de Coordinación Comercial.
- f) Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, Decreto Número 52-2003.

1.1.1 Ley General de Electricidad

La Ley General de Electricidad, determina con claridad los aspectos asociados a la rectoría, la facilitación, la regulación y la coordinación comercial de las actividades del subsector eléctrico y las sustenta en un marco institucional conformado por tres entidades:

- a) Ministerio de Energía y Minas -MEM-;
- b) Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE-; y,
- c) Administrador del Mercado Mayorista -AMM-.

Esto garantiza que los productores y consumidores obtengan las señales correctas para el funcionamiento eficiente del mercado eléctrico.

1.1.1.1 Ministerio de Energía Y Minas

Es el órgano del Estado responsable de:

- a) Aplicar la Ley General de Electricidad y su Reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones.
- b) Formular y coordinar las políticas, Planes de Estado y Programas Indicativos relativos al subsector eléctrico.
- c) Elaborar informes de evaluación socioeconómica para costear total o parcialmente recursos en proyectos de electrificación rural.
- d) Fomentar el desarrollo de los recursos renovables de energía.

1.1.1.2 Comisión Nacional de Energía Eléctrica

La Comisión es un organismo técnico del Ministerio de Energía y Minas, con independencia funcional, encargado de formular, implantar y fiscalizar el marco regulatorio y normativo que define las reglas del juego del desarrollo de las actividades del subsector eléctrico y la actuación de los agentes económicos que intervienen en el mismo, para ello, la Ley le asigna las siguientes atribuciones y funciones:

- a) Cumplir y hacer cumplir la Ley y sus reglamentos, en materia de su competencia e imponer las sanciones a los infractores.
- b) Velar por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios, proteger los derechos de los usuarios y prevenir conductas atentatorias contra la libre empresa, así como prácticas abusivas o discriminatorias.
- c) Definir las tarifas de transmisión y distribución, sujetas a regulación, así como la metodología para el cálculo de las mismas.

- d) Dirimir las controversias que surjan entre los agentes del subsector eléctrico actuando como árbitro entre las partes cuando no hayan llegado a un acuerdo.
- e) Emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas.
- f) Emitir las disposiciones y normativas para garantizar el libre acceso y uso de las líneas de transmisión y redes de distribución, de acuerdo a lo dispuesto en la Ley y su reglamento.

1.1.1.3 Administrador del Mercado Mayorista

Entidad privada sin fines de lucro, que coordina las transacciones entre los participantes del Mercado Mayorista, cuyas funciones son:

- a) Coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte, al mínimo costo para el conjunto de operaciones del mercado mayorista, en un marco de libre contratación entre generadores, comercializadores, incluidos importadores y exportadores, grandes usuarios y distribuidores.
- b) Establece precios de mercado de corto plazo para las transferencias de potencia y energía entre sus agentes, cuando éstas no corresponden a contratos de largo plazo libremente pactados.
- c) Garantiza la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica.

1.2 Sistemas de energía eléctrica

1.2.1 El sistema eléctrico

El sistema eléctrico de Guatemala, está conformado por el sistema generación, el sistema de transporte y el sistema de distribución final de electricidad.

1.2.1.1 Sistema de generación

Este sistema está conformado por centrales: hidroeléctricas, termoeléctricas (turbinas de vapor, turbinas de gas y motores de combustión interna), geotérmicas y por centrales cogeneradoras. Las centrales utilizadoras de recursos renovables de energía en el 2004 representaron el 48.4% de la potencia firme. De 1996 a 2004 la potencia firme se incrementó en 764.5 MW, con una tasa de crecimiento promedio anual de 7.2%, siendo principalmente del tipo termoeléctrico.

1.2.1.2 Sistema de transporte

El sistema de transporte está conformado por el sistema principal y el sistema secundario. El sistema principal es compartido por los generadores e incluye la interconexión Guatemala—El Salvador. El sistema secundario está conformado por la infraestructura eléctrica utilizada por los generadores para el suministro de energía al sistema principal; está dividido geográficamente en tres áreas: Central, Occidental y Oriental. La red de transporte opera básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138 y 69 kv.

El sistema de transporte para el futuro estará interconectado con Centroamérica, México y Belice, a través de:

- a) Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central (SIEPAC).
- b) Interconexión Guatemala-México.
- c) Interconexión Guatemala-Belice.

1.2.1.3 Sistema de distribución

El sistema de distribución final de electricidad está conformado por las siguientes empresas privadas:

- a) Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. –EEGSA-, quien presta el servicio eléctrico en el área central del país.
- b) La Distribuidora de Electricidad de Occidente, S. A., -DEOCSA-, quien presta el servicio eléctrico en los departamentos del occidente del país.
- c) La Distribuidora de Electricidad de Oriente, S. A., -DEORSA-, quien presta el servicio eléctrico en los departamentos del oriente.
- d) Otras empresas privadas que prestan servicio de distribución final.
- e) Las Empresas Eléctricas Municipales –EMM- (Empresas Públicas).

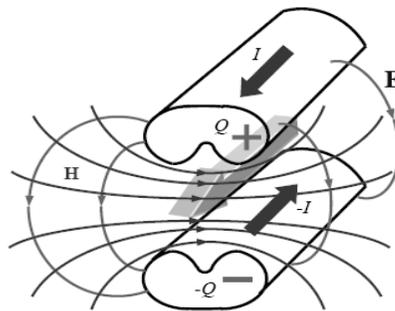
2. LAS PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL TRANSPORTE DE ENERGÍA

2.1 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión constituyen las arterias a través de las cuales fluye la energía eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo. La transmisión de dicha energía puede realizarse por corriente alterna (c.a.) o directa (c.d.), y puede ser de transmisión aérea o subterránea.

Una línea de transmisión es un dispositivo que se usa para transportar energía electromagnética y/o información de un sitio a otro. Y ésta se puede representar como un par de electrodos paralelos por una longitud grande (en relación con la longitud de onda) en una dirección dada².

Figura 1. Par de electrodos paralelos



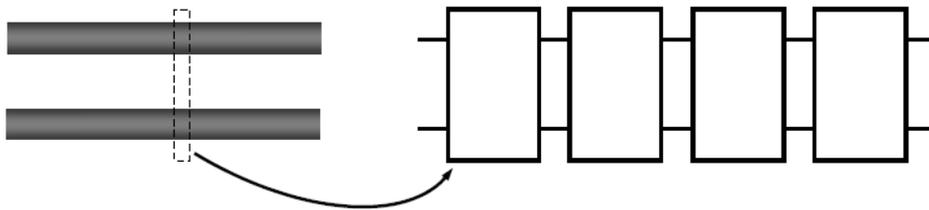
En este par de electrodos circulan cargas y corriente opuestas, formando un capacitor y una inductancia distribuidos respectivamente a lo largo de la línea.

² Juan C. Fernández. Electromagnetismo. (Argentina: Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Capítulo 6).

Los ejemplos más importantes de líneas de transmisión son el par bifilar, el coaxial y la microcinta.

Es posible usar un modelo cuasiestático y representar a la línea como una cascada de cuadripolos con el fin de obtener un modelo matemático representativo de las pérdidas en una línea de transmisión.

Figura 2. Representación de una línea como una cascada de cuadripolos



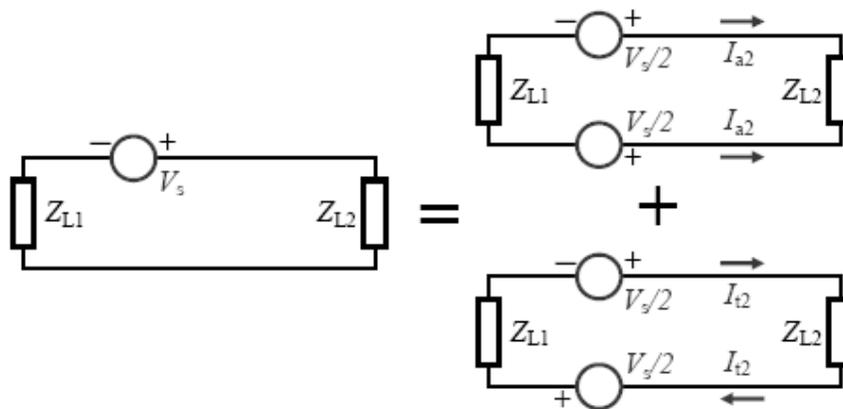
Cada cuadripolo representa un tramo de línea de pequeña longitud frente a la mínima longitud de onda de la señal. Por lo tanto cada tramo se puede modelizar como un circuito. A este modelo se le conoce como modelo de constantes distribuidas.

La energía electromagnética puede ingresar a una línea de transmisión en forma de excitación concentrada o distribuida. Las fuentes concentradas se aplican en un punto determinado de la línea y la señal se propaga por la línea desde allí. Se simula este tipo de excitación mediante fuentes de tensión y/o corriente conectadas en el sitio de ingreso de la excitación (por ejemplo, la conexión de la línea a otro circuito).

En el caso de una fuente distribuida la excitación se distribuye a lo largo de la línea.

Una excitación puede generar distintas respuestas en una línea. En la figura 3, se esquematiza una fuente concentrada en un punto de una línea cargada en ambos extremos.

Figura 3. En la figura se esquematiza una fuente concentrada en un punto de una línea cargada en ambos extremos

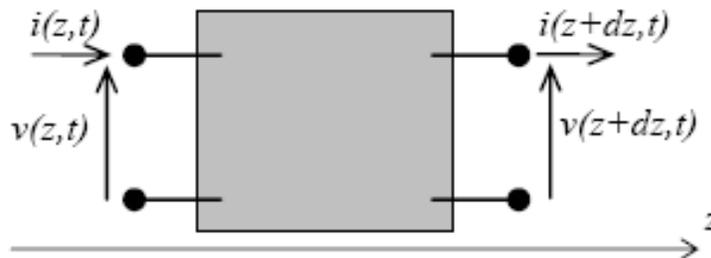


Esta fuente produce corrientes a lo largo de la línea que pueden representarse como la superposición de corrientes en modo común (modo de antena) y corrientes en modo diferencial (modo de línea de transmisión). La circulación de corrientes variables en el tiempo produce emisión de radiación electromagnética. En el modo de antena las corrientes circulan en el mismo sentido en ambos conductores, lo que refuerza los campos individuales radiados, mientras que en el modo de línea las corrientes tienen sentidos opuestos y la radiación neta es baja. Por este motivo es importante analizar el comportamiento de la radiación de líneas para estimar la posible interferencia por radiación. Este fenómeno no se observa en los circuitos de parámetros concentrados ya que la eficiencia de radiación de tramos cortos de corriente (comparados con la longitud de onda de los campos) es muy baja.

2.1.1 Modelo circuital de la línea bifilar ideal

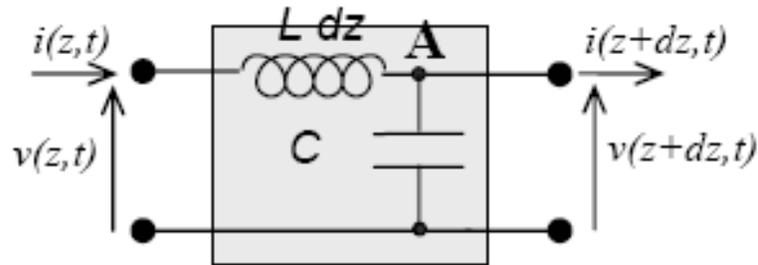
En una línea de transmisión hay dimensiones (transversales), que cumplen la condición cuasiestática ($D \ll \lambda$), pero la otra dimensión (longitudinal) habitualmente no la cumple. Sin embargo, es posible ver a la línea como una sucesión o cascada de cuadripolos de longitud infinitesimal y para cada uno de ellos usar un modelo circuital, cuyos parámetros descriptivos son las tensiones y corrientes a la entrada y salida, ya que las dimensiones del cuadripolo satisfacen la condición cuasiestática. Se elige la dirección del eje cartesiano z a lo largo de la línea. Cada tramo de longitud dz a lo largo de la dirección z puede asociarse a un cuadripolo, como se esquematiza en la figura 4.

Figura 4. Modelo circuital de la línea bifilar ideal



Asumiendo que la línea no presenta pérdidas de energía (línea ideal). En tal caso los conductores de la línea serán perfectos ($\sigma \rightarrow \infty$) y el dieléctrico entre ellos tampoco tendrá pérdidas. Las cargas y corrientes en los conductores crearán campos eléctricos y magnéticos cuya energía almacenada puede modelizarse por componentes reactivos puros: capacidad e inductancia. La capacidad está asociada al campo eléctrico creado por las cargas en los conductores de la línea y la inductancia al campo magnético generado por las corrientes que circulan por ella. Así se presenta el cuadripolo de la figura 5, donde Ldz es la inductancia del tramo y Cdz su capacidad.

Figura 5. Cuadripolo, con representación de la inductancia y la capacitancia



Ahora se aplican las leyes de *Kirchhoff* a este modelo cuasiestático. La primera ley, aplicada al nodo A lleva a:

$$i(z+dz) - i(z) + Cdz \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

donde el último término representa la corriente que sale de A por el capacitor. Pero, a primer orden:

$$i(z+dz) - i(z) \approx \frac{\partial i}{\partial z} dz \Rightarrow \frac{\partial i}{\partial z} \approx -C \frac{\partial v}{\partial t}$$

Análogamente, si aplicamos la segunda ley de *Kirchhoff* recorriendo la malla formada por el cuadripolo en sentido antihorario, tenemos:

$$v(z+dz) - v(z) + Ldz \frac{\partial i}{\partial t} \approx 0$$

de donde se obtiene, nuevamente a primer orden:

$$\frac{\partial v}{\partial z} \approx -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

En resumen:

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad \frac{\partial v}{\partial z} \approx -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1 \text{ y } 2)$$

Estas dos ecuaciones diferenciales ligadas para la tensión y la corriente a la entrada del cuadripolo son las llamadas “ecuaciones del telegrafista” para la línea ideal.

Con el fin de analizar el significado de estas ecuaciones es conveniente desacoplar las ecuaciones diferenciales, para lo cual se deriva la primera respecto del tiempo y la segunda respecto de z:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial z}$$

donde se ha sobreentendido que las cantidades se calculan en z. Pero las derivadas cruzadas son iguales, de manera que nos queda:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial para la tensión $v(z,t)$ se denomina “ecuación de ondas o ecuación de *D’Alembert*”. Es una ecuación diferencial lineal homogénea a derivadas parciales, cuya solución es cualquier función tipo:

$$v(z,t) = f(z \mp ct) \quad \text{con} \quad c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4 \text{ y } 5)$$

Esta función representa una onda que se propaga a lo largo del eje z con velocidad c, de comportamiento similar a las ondas en una cuerda vibrante. Si se toma el signo (-) de la doble determinación, la onda se propaga en el sentido de +z (onda progresiva), mientras que si se toma el signo (+) la propagación es según -z (onda regresiva). Se obtiene una ecuación idéntica para la corriente i(z,t) a lo largo de la línea.

Se observa entonces que la solución a las ecuaciones del telegrafista en una línea ideal son ondas de tensión y corriente que se propagan a lo largo de la línea.

Además las ondas de tensión y corriente están vinculadas entre sí. Considerando una onda progresiva con: $v(z,t) = f(z - ct)$ y $i(z,t) = g(z - ct)$.

Entonces:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial u} \\ \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial g}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = -c \frac{\partial g}{\partial u} \end{cases}$$

Luego:

$$\frac{\partial f}{\partial u} = LC \frac{\partial g}{\partial u}$$

e integrando:

$$f(z - ct) = \sqrt{\frac{L}{C}} g(z - ct)$$

de donde: $v(z, t) = Z_0 i(z, t)$ con $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (6)

La cantidad Z_0 tiene dimensiones de impedancia y se llama "impedancia característica" de la línea. Junto con la velocidad de propagación de las ondas $c=1/LC$ son los parámetros fundamentales que describen el comportamiento de la línea como dispositivo transmisor de energía. Si ahora se toma el par de funciones correspondiente a una onda regresiva:

$$v(z,t) = f(z+ct) \quad \text{y} \quad i(z,t) = g(z+ct) \quad (7)$$

es fácil demostrar que: $v(z,t) = -Z_0 i(z,t)$ de modo que en general:

$$v_{\pm}(z,t) = \pm Z_0 i_{\pm}(z,t) \quad \text{con} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

donde el signo + corresponde a la onda progresiva y el signo - a la regresiva.

Se debe señalar las diferencias de este modelo circuital de constantes distribuidas con el modelo de constantes concentradas. En un circuito de constantes concentradas, la corriente que entra en un "nodo" es la misma que la que sale (1ra. Ley de *Kirchhoff*), y las variaciones de tensión a lo largo del circuito se concentran en cada elemento concentrado, que desde el punto de vista geométrico no tiene extensión. No hay variación de tensión a lo largo de los "cables de conexión" entre elementos concentrados, que se consideran volúmenes equipotenciales.

En una línea de transmisión la situación es totalmente diferente. La corriente que cruza secciones transversales a la línea, y la tensión entre los conductores medida sobre una sección transversal, dependen de la posición. Así, no se cumplen las leyes de *Kirchhoff*. Hay acumulación de carga a lo largo de la línea. La tensión varía punto a punto a lo largo de la línea y no hay sitios (salvo que se conecte un elemento concentrado desde fuera de la línea) donde haya una "caída" abrupta de tensión.

Por este motivo, la línea no puede reemplazarse por una impedancia concentrada, salvo en el caso particular en que su dimensión longitudinal sea despreciable frente a la mínima longitud de onda de la señal (condición cuasiestacionaria).

2.1.2 Líneas con pérdidas

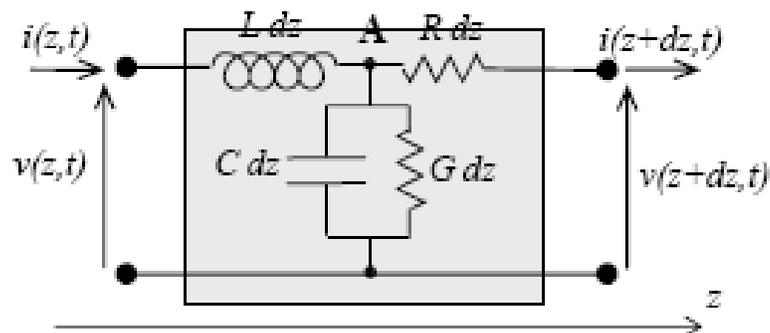
El modelo que se planteó es un modelo ideal, es decir, sin pérdidas de energía; sin embargo, todos los sistemas reales tienen pérdidas.

En una línea de transmisión las pérdidas se dan por:

- Pérdidas por efecto *Joule* en los conductores.
- Pérdidas dieléctricas.

El modelo circuital de cuádrupolo puede incorporar estas pérdidas mediante una resistencia en serie, que modela las pérdidas por efecto Joule debidas a la circulación de corriente en los conductores de la línea y una conductancia en paralelo, que modela las pérdidas dieléctricas mediante una conductividad equivalente del material, como se ilustra en la figura 6.

Figura 6. Modelo circuital de un cuádrupolo



Para obtener las ecuaciones del telegrafista para este modelo de la línea con pérdidas, se aplica nuevamente la primera ley de *Kirchhoff* al nodo A:

$$i(z + dz) - i(z) = -Gdzv(z) - Cdz \frac{\partial v}{\partial t_z} \Rightarrow \frac{\partial i}{\partial z_z} = -Gv(z) - C \frac{\partial v}{\partial t_z}$$

Recorriendo ahora la malla que forma el circuito, por la segunda ley de *Kirchhoff*:

$$v(z + dz) - v(z) = -Rdzi(z) - Ldz \frac{\partial i}{\partial t_z} \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial z_z} = -Ri(z) - L \frac{\partial i}{\partial t_z}$$

Las ecuaciones diferenciales acopladas son las nuevas ecuaciones del telegrafista. Para resolverlas nuevamente, se desacoplan las ecuaciones a través de las derivadas cruzadas para obtener:

$$\frac{\partial v}{\partial z_z} = -Ri(z) - L \frac{\partial i}{\partial t_z} \Rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -R \frac{\partial i}{\partial z} - L \frac{\partial^2}{\partial t \partial z} = RGv + RC \frac{\partial v}{\partial t} - L \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial z}$$

$$\frac{\partial i}{\partial z_z} = -Gv(z) - C \frac{\partial v}{\partial t_z} \Rightarrow \frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} = -G \frac{\partial v}{\partial t} - C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

de donde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} &= RGv + (RC + LG) \frac{\partial v}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial z^2} &= RGi + (RC + LG) \frac{\partial i}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{aligned}$$

Estas son ecuaciones diferenciales de tipo ondulatorio modificado. No existe solución general de estas ecuaciones como en el caso ideal. Sin embargo, cualquier forma de onda físicamente realizable puede expresarse mediante una integral de *Fourier* y la resolución es simple para variaciones armónicas, en notación fasorial:

$$v(z, t) = v_s(z)e^{i\omega t} \quad i(z, t) = i(z)e^{i\omega t}$$

Con esta elección la ecuación diferencial para la tensión queda:

$$\frac{d^2 v_s}{dz^2} = [RG + i\omega(RC + LG) - \omega^2 LC] v_s \Rightarrow \frac{d^2 v_s}{dz^2} + \gamma^2 v_s = 0$$

con:

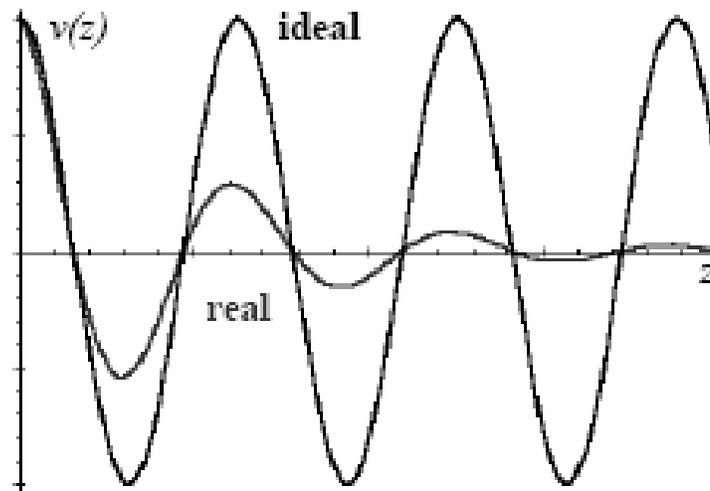
$$\gamma = \beta - i\alpha = \sqrt{\omega^2 LC - RG - i\omega(RC + LG)} = \sqrt{-(R + i\omega L)(G + i\omega C)} \quad (8)$$

y se obtiene una ecuación similar para la corriente. Estas ecuaciones son llamadas "ecuaciones de *Helmholtz*", donde el número de onda $\gamma = \beta - i\alpha$ es complejo, indicando una propagación con atenuación, causada por las pérdidas.

Las ondas de tensión y corriente con número de onda complejo quedan así:

$$v(z, t) = v_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad i(z, t) = i_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (9 \text{ y } 10)$$

Figura 7. Ondas armónicas de igual frecuencia, una idea y otra real



En la figura 7 se observa que las amplitudes decrecen a medida que la onda se propaga por la atenuación producida por las pérdidas.

En general, $\omega t - \beta z = cte. \Rightarrow v_f = \frac{\omega}{\beta}$ (relación entre ω y β), es no lineal por la presencia de la raíz cuadrada en la expresión de γ . Esto lleva a que la velocidad de las ondas (la velocidad de fase) dependa de la frecuencia, fenómeno conocido como “dispersión” de un paquete de ondas porque algunas componentes de *Fourier* viajan más rápido que otras.

Como
$$\gamma = \sqrt{-(R + i\omega L)(G + i\omega C)} = \omega\sqrt{LC} \sqrt{\left(1 - i\frac{R}{\omega L}\right)\left(1 - i\frac{G}{\omega C}\right)}$$

si
$$\frac{R}{\omega L} = \frac{G}{\omega C} \Rightarrow \gamma = \beta - i\alpha = \omega\sqrt{LC} \left(1 - i\frac{R}{\omega L}\right)$$

se ve que en este caso la relación entre ω y β es lineal por lo que no hay dispersión. Las líneas que cumplen esta condición son entonces no dispersivas o no distorsivas.

Si se define:

$$Z = R + i\omega L \quad (\text{impedancia serie por unidad de longitud}) \quad (11)$$

$$Y = G + i\omega C \quad (\text{admitancia paralelo por unidad de longitud}) \quad (12)$$

entonces:

$$\gamma = \sqrt{-ZY} \quad (13)$$

Si se vincula nuevamente las ondas de tensión y de corriente mediante las ecuaciones del telegrafista se puede obtener la expresión de la impedancia característica de la línea con pérdidas:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = Z_0' + iZ_0'' \quad (14)$$

La impedancia característica compleja indica que hay un desfase temporal entre la onda de tensión y la onda de corriente para el mismo z en la línea.

Análogamente se puede demostrar que para una onda regresiva:

$$v(z, t) = v_0 e^{i(\omega t + kz)} \quad i(z, t) = i_0 e^{i(\omega t + kz)} \quad \Rightarrow \quad V_0 = -Z_0 i_0$$

2.1.3 Parámetros de la línea

La razón principal para realizar un modelo matemático de los parámetros que definen una línea de transmisión, es entender los efectos que éstos realizan sobre los voltajes de barra y flujos de potencia; dentro de un sistema eléctrico.

La línea de transmisión real presenta cuatro parámetros que afectan su capacidad de operación, estos son: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. Es posible dividirlos en dos grupos: resistencia en serie y admitancia en paralelo.

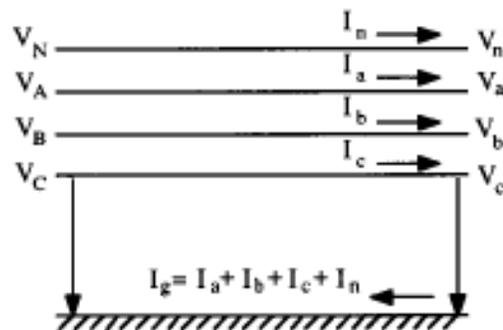
Aunque el método de las componentes simétricas se ha usado para simplificar muchos de los problemas en el análisis de sistemas de potencia, los párrafos siguientes describen las fórmulas en el cálculo de los parámetros de la línea, de una forma mucho más general y no se limita a la aplicación de componentes simétricas. La secuencia de impedancias y admitancias usadas en el método de las componentes simétricas pueden ser calculadas fácilmente por una matriz transformada³.

³ Mo-Shing Chen. Alternating Current Overhead: Line Parameters, Models, Standard Voltages, Insulators. The Electrical Engineering Handbook. Editor en Jefe Richard C. Dorf.

2.1.3.1 Impedancia serie

La ecuación red de una línea de transmisión de tres fases, con un alambre neutro (como se muestra en la figura 8) en la que se consideran sólo impedancias serie, se da de la siguiente forma:

Figura 8. Línea de transmisión de tres fases, con un alambre neutro



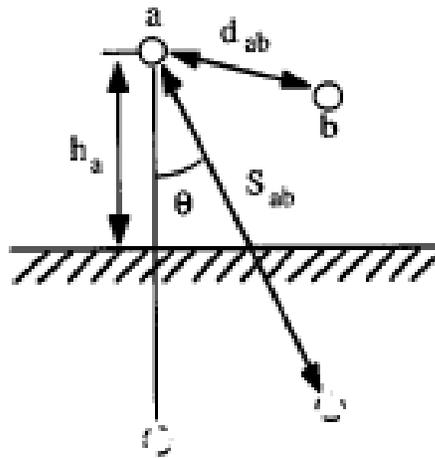
$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa-g} & Z_{ab-g} & Z_{ac-g} & Z_{an-g} \\ Z_{ba-g} & Z_{bb-g} & Z_{bc-g} & Z_{bn-g} \\ Z_{ca-g} & Z_{cb-g} & Z_{cc-g} & Z_{cn-g} \\ Z_{na-g} & Z_{nb-g} & Z_{nc-g} & Z_{nn-g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix}$$

donde Z_{ii-g} = impedancia propia del conductor de la fase i
 Z_{ij-g} = impedancia mutua entre el conductor de la fase i y el conductor de la fase j

El subíndice g indica un retorno a tierra. Las fórmulas para calcular Z_{ii-g} y Z_{ij-g} fueron desarrolladas por *J.R. Carson*, quien se basó en una tierra de conductibilidad uniforme y de magnitud semi-infinita.

Se muestra en la figura 9, dos conductores a y b con una tierra de retorno. Las impedancias propia y mutua medidas en *ohms* por milla, en donde el “primado” se usa para indicar los parámetros distribuidos en porcentaje de la longitud; $z_a = r_c + jx_i$ = impedancia interna del conductor a, Ω/mi ; h_a = altura del conductor a, ft; r_a = radio del conductor a, ft; d_{ab} = distancia entre conductores a y b, ft; S_{ab} = distancia desde un conductor a la imagen del otro, ft; $w = 2\pi f$; f = frecuencia, ciclos/s; μ_0 = permeabilidad magnética del espacio vacío; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \times 1609.34$ H/mi; p y q son las condiciones de corrección por el efecto de retorno de tierra.

Figura 9. Diagrama geométrico de los conductores a y b



$$Z'_{aa-g} = z_a + j\omega \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2h_a}{r_a} + \omega \frac{\mu_0}{\pi} (p + jq) \quad (15)$$

$$Z'_{ab-g} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{S_{ab}}{d_{ab}} + \omega \frac{\mu_0}{\pi} (p + jq) \quad (16)$$

La impedancia interna del conductor, consiste en la resistencia efectiva y la reactancia interior. La resistencia efectiva es afectada por tres factores: la temperatura, frecuencia, y la densidad de corriente. Respecto al efecto de la temperatura en la resistencia, puede aplicarse una corrección:

$$R_{nueva} = R_{20^{\circ}} [1 + \alpha(T_{nueva} - 20)] \quad (17)$$

donde R_{nueva} = resistencia a una nueva temperatura, T_{nueva} = nueva temperatura en $^{\circ}\text{C}$, R_{20} = resistencia a 20°C y α = coeficiente de temperatura de la resistencia.

Tabla I. Propiedades eléctricas de los materiales usados en líneas de transmisión

Metal	Relative Conductivity (Copper = 100)	Electrical Resistivity at 20°C , $\Omega \cdot \text{m}$ (10^{-8})	Temperature Coefficient of Resistance (per $^{\circ}\text{C}$)
Copper (HC, annealed)	100	1.724	0.0039
Copper (HC, hard-drawn)	97	1.777	0.0039
Aluminum (EC grade, 1/2 H-H)	61	2.826	0.0040
Mild steel	12	13.80	0.0045
Lead	8	21.4	0.0040

Un aumento en la frecuencia causa la uniformidad de la densidad de corriente. Este fenómeno se llama "efecto piel". El efecto piel aumenta la resistencia eficaz ac del conductor y disminuye la inductancia interna. La impedancia interna de un conductor redondo sólido en *ohms* por metro, considerando el efecto piel se calcula por:

$$z = \frac{\rho m I_0(mr)}{2\pi r I_1(mr)} \quad (18)$$

donde ρ = resistividad del conductor, Ω m; r = radio del conductor, m; I_0 = función de *Bessel* modificada del primer tipo de orden 0; I_1 = función de *Bessel* modificada del primer tipo de orden 1; y $m = \sqrt{j\omega\mu/\rho}$ = recíproco de la profundidad compleja de penetración.

Respecto a los términos de corrección del efecto de retorno a tierra p y q, para una perfecta conducción a tierra deben de ser cero. La determinación de p y q requiere la evaluación de una integral infinita. Desde que la serie converge rápidamente a la frecuencia de la potencia o menos, pueden ser calculados por las siguientes ecuaciones:

$$p = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos \theta + \frac{k^2}{16} \left[\left(0.6728 + \ln \frac{2}{k} \right) \cos 2\theta + \theta \sin 2\theta \right] + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi k^4 \cos 4\theta}{1536} \quad (19)$$

$$q = -0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos \theta - \frac{\pi k^2 \cos 2\theta}{64} + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{k^4}{384} \left[\left(\ln \frac{2}{k} + 1.0895 \right) \cos 4\theta + \theta \sin 4\theta \right] \quad (20)$$

con

$$k = 8.565 \times 10^{-4} D \sqrt{\frac{f}{\rho}}$$

donde $D = 2h_1$ (ft), $\theta = 0$, para la impedancia propia; $D = S_{ij}$ (ft), para la impedancia mutua; y ρ = resistividad de la tierra, Ω/m^3 .

2.1.3.2 Admitancia en derivación

La admitancia en paralelo consiste en la conductancia y la susceptancia capacitiva. La conductancia de una línea de transmisión es normalmente muy pequeña y es posible despreciarla. Una matriz capacitiva que relaciona los voltajes de fase y las cargas de una línea de transmisión de tres-fase es:

$$Q_{abc} = C_{abc} \cdot V_{abc} \quad \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

La matriz de capacitancias puede calcularse invirtiendo el coeficiente potencial de la matriz.

$$Q_{abc} = P_{abc}^{-1} \cdot V_{abc} \quad V_{abc} = P_{abc} \cdot Q_{abc}$$

o

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix}$$

$$P_{ii} = \frac{l}{2\pi\epsilon} \ln \frac{h_i}{r_i} \quad (21)$$

$$P_{ij} = \frac{l}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S_{ij}}{d_{ij}} \quad (22)$$

donde d_{ij} = distancia entre los conductores i y j , h_i altura del conductor i , S_{ij} = distancia desde un conductor y la imagen del otro, r_i = radio del conductor i , ϵ = permitividad del conductor, y l = longitud del conductor.

Aunque la mayoría de las líneas son conductores desnudos, los conductores aéreos pueden consistir en cables con cinta protectora o envoltura. Para un conductor con envoltura conectada a tierra, la capacitancia C_{ij} en por-unidad de longitud puede ser fácilmente calculada por la siguiente ecuación, y todas la C_{ij} son iguales a cero:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (23)$$

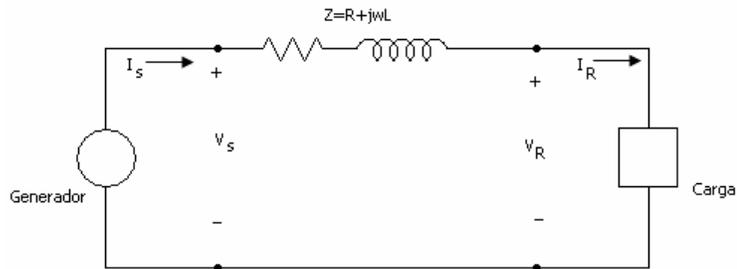
ϵ_0 = permitividad absoluta (constante dieléctrica del espacio vacío),
 ϵ_r = permitividad relativa del aislamiento del cable, r_1 = radio de afuera del centro del conductor, y r_2 = radio de adentro del conductor.

2.1.4 Circuito equivalente de una línea de transmisión⁴

2.1.4.1 Línea de transmisión corta

El circuito equivalente para una línea de transmisión corta, respecto de la capacitancia, menores de 80 km se muestra en la figura 10.

Figura 10. Circuito equivalente de una línea de transmisión corta



Se resuelve

$$I_S = I_R \quad (24)$$

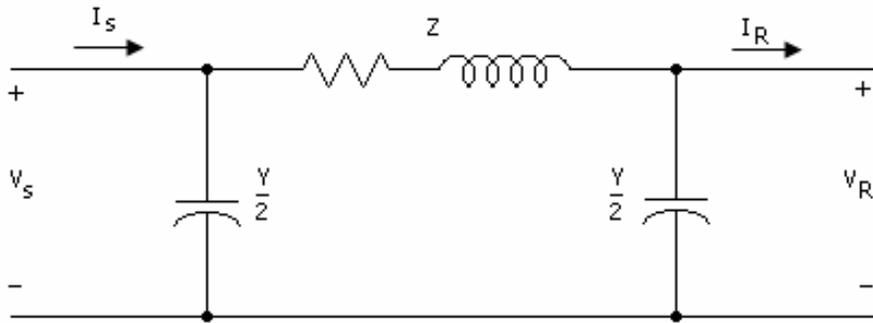
$$V_S = V_R + I_R Z$$

⁴ John J. Grainger y William Stevenson. Análisis de Sistemas de Potencia. (Editorial McGraw Hill) pp. 181-199.

2.1.4.2 Línea de transmisión media

El circuito equivalente de una línea de transmisión media, respecto de la capacitancia, que está entre los 80 km y los 240 km se muestra en la figura 11 (circuito nominal π).

Figura 11. Circuito equivalente de una línea de transmisión media



En este modelo se incluye la admitancia en paralelo (generalmente una capacitancia pura) dividida en dos partes iguales, y cada una se coloca en los extremos generador y receptor.

Para encontrar I_S y V_S se observa que la corriente en la capacitancia en el extremo receptor es $V_R Y/2$ y la corriente en la rama serie es $I_R + V_R Y/2$.

Encontrando V_S

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R$$

reordenando

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (25)$$

Encontrando I_S

La corriente en la capacitancia en derivación en el extremo generador es $V_S Y/2$, y sumada a la corriente en la rama serie:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R$$

Al sustituir V_S en la ecuación anterior

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (26)$$

Expresando las ecuaciones en forma general

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

en donde

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1$$

$$B = Z$$

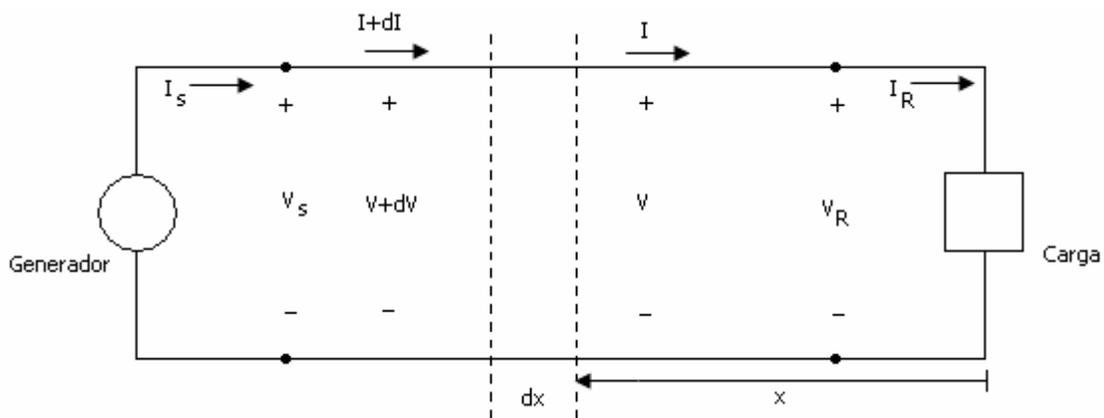
$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right)$$

A las constantes A, B, C y D, se les denomina “constantes generalizadas de circuito” de la línea de transmisión.

2.1.4.3 Línea de transmisión larga

El diagrama esquemático de una línea de transmisión larga, respecto de la capacitancia, mayor a 240 km se muestra en la figura 12.

Figura 12. Diagrama esquemático de una línea de transmisión larga



Se considera un elemento diferencia de longitud dx , a una distancia x desde el extremo receptor de la línea. En donde, zdx y ydx son la impedancia serie y la admitancia en paralelo de la sección elemental.

La corriente promedio en la línea es: $(I+I+dl)/2$, y el incremento de V en dx se expresa:

$$dV = \frac{I + I + dl}{2} zdx = I_z dx$$

despreciando los productos de las cantidades diferenciales,

$$dl = \frac{V + V + dV}{2} ydx = V_y dx$$

En donde se obtienen las ecuaciones

$$\frac{dV}{dx} = Iz \qquad \frac{dI}{dx} = Vy$$

y al derivar las anteriores ecuaciones respecto de x

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \qquad \frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx}$$

Sustituyendo los valores de dI/dx y dV/dx en las ecuaciones anteriores

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV \qquad \frac{d^2I}{dx^2} = yzI$$

Las soluciones para las anteriores ecuaciones se pueden representar como:

$$V = A_1 \varepsilon^{\sqrt{yz}x} + A_2 \varepsilon^{-\sqrt{yz}x}$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_1 \varepsilon^{\sqrt{yz}x} - \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_2 \varepsilon^{-\sqrt{yz}x}$$

Evaluando las constantes A_1 y A_2 , usando las condiciones en el extremo receptor de la línea. Cuando $x = 0$, $V = V_R$ e $I = I_R$

$$V_R = A_1 + A_2 \qquad I_R = \frac{1}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2)$$

Sustituyendo

$$Z_C = \sqrt{z/y}$$

y al resolver para A_1

$$A_1 = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} \quad A_2 = \frac{V_R - I_R Z_C}{2}$$

Entonces se sustituyen los valores encontrados en las ecuaciones y al hacer

$\gamma = \sqrt{yz}$, se obtiene:

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} \epsilon^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} \epsilon^{-\gamma x} \quad (27)$$

$$I = \frac{V_R / Z_C + I_R}{2} \epsilon^{\gamma x} - \frac{V_R / Z_C - I_R}{2} \epsilon^{-\gamma x} \quad (28)$$

En donde Z_C es llamada “impedancia característica” de la línea, y γ se le conoce como “constante de propagación”.

2.1.4.3.1 Forma hiperbólica de las ecuaciones

La forma más conveniente de representar las ecuaciones de una línea de transmisión para los cálculos de corriente y voltaje de la línea de potencia, es la hiperbólica.

Las funciones hiperbólicas se definen en forma exponencial de la siguiente manera:

$$\sinh \theta = \frac{\epsilon^{\theta} - \epsilon^{-\theta}}{2}$$

$$\cosh \theta = \frac{\epsilon^{\theta} + \epsilon^{-\theta}}{2}$$

Ahora las nuevas ecuaciones para voltaje y corriente sustituyendo las funciones hiperbólicas por los términos exponenciales son:

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma x$$

Valuando para $x = l$, en el extremo receptor

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma l$$

ahora las constantes generalizadas para el circuito son:

$$A = \cosh \gamma l \quad B = Z_C \sinh \gamma l$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} \quad D = \cosh \gamma l$$

Al resolver las ecuaciones para V_R e I_R en términos de V_S e I_S

$$V_R = V_S \cosh \gamma l - I_S Z_C \sinh \gamma l \quad (29)$$

$$I_R = I_S \cosh \gamma l - \frac{V_S}{Z_C} \sinh \gamma l \quad (30)$$

2.1.4.3.2 Circuito equivalente

El circuito equivalente de una línea de transmisión larga puede representarse mediante una red de parámetros concentrados, utilizando parámetros distribuidos.

En páginas anteriores se representó una línea media utilizando un circuito nominal π . Ahora, utilizando el mismo circuito para representar la línea larga con Z' como la rama serie y $Y'/2$ como la rama en paralelo se tiene:

$$V_S = \left(\frac{Z'Y'}{2} + 1 \right) V_R + Z' I_R$$

Para que el circuito sea equivalente al de la línea de transmisión larga, los coeficientes V_R e I_R en la ecuación anterior, deben ser iguales a los coeficientes de V_R e I_R de las ecuaciones 29 y 30.

Igualando coeficientes I_R de las ecuaciones, se obtiene:

$$\begin{aligned} Z' &= Z_C \sinh \gamma l \\ Z' &= \sqrt{\frac{z}{y}} \sinh \gamma l = z l \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{z y l}} \\ Z' &= Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \end{aligned} \quad (31)$$

siendo $Z = z l$, la impedancia serie total de la línea.

Igualando coeficientes V_R de las ecuaciones, se obtiene:

$$\frac{Z'Y'}{2} + 1 = \cosh \gamma l$$

Al sustituir $Z_c \sinh \gamma l$ por Z'

$$\frac{Y' Z_c \sinh \gamma l}{2} + 1 = \cosh \gamma l$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l}$$

Si sabemos de la identidad

$$\tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l}$$

entonces

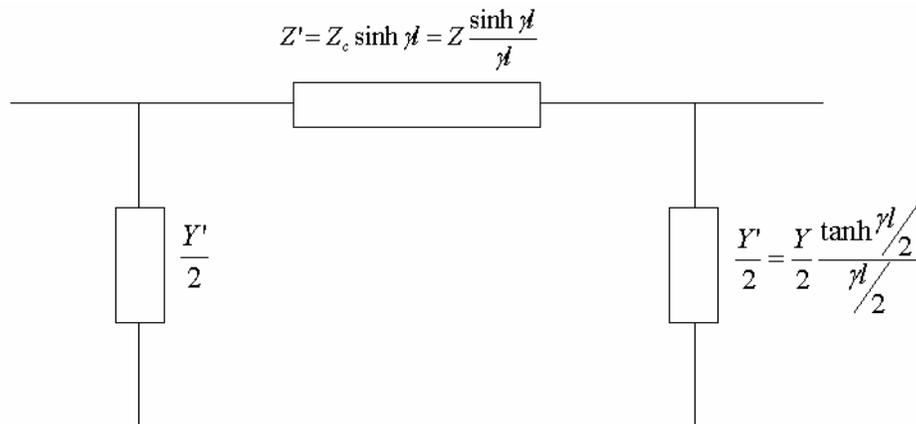
$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma l}{2}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh \gamma l / 2}{\gamma l / 2} \quad (32)$$

donde Y es igual a Y_l , la admitancia paralelo total de la línea.

Por lo que el circuito equivalente de la línea larga queda de la siguiente manera:

Figura 13. Circuito equivalente de una línea larga



3. LOS SUPERCONDUCTORES, UNA ALTERNATIVA

3.1 La superconductividad

Al enfriar ciertos metales y aleaciones por debajo de una temperatura crítica (T_c), del orden de algunos °K, se observa la desaparición repentina de la resistividad eléctrica. Este fenómeno sorprendente se denomina superconductividad y fue observado por primera vez por el holandés *Kamerlingh Onnes* en 1911.

Los materiales superconductores permiten el paso de la corriente eléctrica sin ofrecer resistencia, una propiedad con muchas aplicaciones tecnológicas, como por ejemplo: la generación de campos magnéticos intensos, la fabricación de cables de conducción de energía eléctrica y la electrónica, y esto, sólo si se enfrían por debajo de una cierta temperatura y que la corriente no exceda un cierto valor crítico.

3.1.1 Historia de la superconductividad

La superconductividad fue observada por primera vez en 1911, por el físico *Heike Kamerlingh Onnes* en la Universidad de Leyden, Holanda⁵. Cuando, por primera vez en el mundo, pudo obtener helio líquido con una temperatura de ebullición de 4.22 K, y esto le sirvió para estudiar las propiedades de la materia a estas temperaturas. Al estudiar la resistencia eléctrica de los metales a bajas temperaturas, descubrió que ésta desaparecía súbitamente. Conociéndose así, el estado superconductor de la materia.

⁵ The History of Superconductors, <http://www.superconductors.org>, noviembre de 2005.

Luego, en 1913 obtuvo el premio novel en física por sus descubrimientos en ésta área.

Figura 14. Físico *Heike Kamerlingh Onnes*



El siguiente gran paso en la comprensión de cómo la materia se comporta a temperaturas extremadamente frías, ocurrió en 1933. Los investigadores alemanes *Walter Meissner* y *Robert Ochsenfeld* descubrieron que los materiales superconductores se comportan como un diamagnético perfecto, por lo que no permiten la penetración de líneas de flujo magnético en su interior. Actualmente este fenómeno se le denomina Efecto *Meissner*.

Figura 15. Efecto *Meissner*

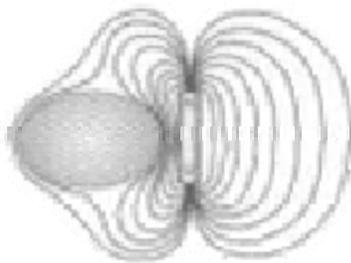


Figura 16. *Walter Meissner*



En las siguientes décadas otros metales superconductores, aleaciones y compuestos fueron descubiertos. En 1941 el superconductor *niubium-nitride* fue descubierto a 16 K. En 1953 el *vanadium-silicon* mostró propiedades superconductoras a los 17.5 K. Y, en 1962 científicos de Westinghouse desarrollaron el primer alambre superconductor comercial; una aleación de *niobium* y *titanium* (NbTi). Se desarrollaron electroimanes partícula-acelerador de alta energía, hechos de niobio-titanio y revestidos en cobre, por los años sesenta; en el Laboratorio de Rutherford-Appleton en el Reino Unido. Y fueron los primeros en emplear un acelerador superconductor en el Fermilab Tevatron, EE.UU. en 1987.

Figura 17. John Bardeen, León Cooper y John Schrieffer



La primera teoría aceptada respecto de la superconductividad, fue propuesta por los físicos americanos *John Bardeen, León Cooper y John Schrieffer*, en 1957. Su teoría sobre la superconductividad se llamó la teoría de BCS - derivado de la primera letra de de cada apellido de los físicos - y eso les hizo ganar un premio Nobel en 1972. La matemáticamente compleja teoría de BCS, explicó la superconductividad a temperaturas cerca del cero absoluto, para los elementos y las aleaciones simples. Sin embargo; a temperaturas más altas y con sistemas diferentes de superconductores, la teoría de BCS se hizo inadecuada para explicar totalmente cómo ocurre la superconductividad.

Figura 18. Brian Josephson



Otro avance teórico significativo se logró en 1962, cuando *Brian D. Josephson*, un estudiante graduado en la Universidad de Cambridge, predijo que la corriente eléctrica fluiría entre 2 materiales superconductores - incluso cuando ellos estén separados por un no-superconductor o aislador -. Su predicción fue confirmada después y por ello ganó una parte del Premio Nobel en Física, en 1973. Este efecto túnel, es conocido actualmente como el "efecto de *Josephson*", y se ha aplicado a dispositivos electrónicos como los SQUID, también a instrumentos capaces de detectar campos magnéticos; incluso aquellos muy débiles.

Figura 19. SQUID



Los años 80's fueron una década de descubrimientos en el campo de superconductividad. En 1964, *Bill Little* de la Universidad de Stanford, sugirió la posibilidad de pensar en superconductores orgánicos, basados en carbón. El primero de estos teóricos superconductores fue sintetizado con éxito en 1980, por el investigador danés *Klaus Bechgaard* de la Universidad de Copenhague, y 3 miembros del equipo francés. El $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ tuvo que ser enfriado a una temperatura de transición de 1.2K (conocida como T_c) y sujeto a una alta presión. Su existencia demostraba la posibilidad de "diseñar" moléculas.

Figura 20. Alex Müller y Georg Bednorz



En 1986, un verdadero descubrimiento fue hecho en el campo de superconductividad. *Alex Müller y Georg Bednorz*, investigadores del Laboratorio de Investigación IBM en Rüsclikon, Suiza, crearon un compuesto cerámico quebradizo que superconducía a la temperatura más alta conocida hasta entonces: 30 K. Este descubrimiento fue tan notable en aquel entonces, pues los cerámicos eran normalmente los aisladores. Ellos no conducen electricidad. Y por eso los investigadores no los habían considerado como los posibles candidatos a superconductores de alta-temperatura. El *Lanthanum*, Bario, Cobre y el compuesto de Oxígeno que *Müller y Bednorz* sintetizaron, se obtuvieron de una manera, todavía aún no entendida.

El descubrimiento de este primer superconductor de óxido de cobre, hizo ganar el Premio Nobel a dos hombres, el año siguiente. Luego se encontró que cantidades diminutas de este material, realmente estaban superconduciendo a 58 K, debido a una cantidad pequeña de plomo que se había agregado para una calibración normal -haciendo el descubrimiento aun más notable-.

Con el descubrimiento de *Müller y Bednorz*, se agitó la actividad en el campo de superconductividad. Investigadores alrededor del mundo empezaron "cocinando" cerámicos de todas las combinaciones imaginables en una demanda para encontrar el T_c (temperatura crítica) más alto. En enero de 1987, un equipo de investigación de la Universidad de Alabama-Huntsville, sustituyó *Yttrium* por *Lanthanum* en la molécula de *Müller y Bednorz* y logró una increíble T_c de 92 K. Por primera vez un material superconductor (hoy llamado YBCO) se había encontrado a temperaturas más calientes que el nitrógeno líquido -un refrigerante disponible-. Adicionalmente se han logrado hits usando materiales exóticos; como elementos de peróxidos cerámicos, que a menudo son tóxicos. La clase actual (o "sistema") de superconductores cerámicos con temperaturas de transición más altas, son los compuestos de *mercuric-cuprates*. La primera síntesis de uno de estos compuestos se logró en 1993 por Prof. Dr. *Ulker Onbasli* en la Universidad de Colorado, y por el equipo de *A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo y H. R. Ott de Zurich*, Suiza. El record mundial de T_c es de 138 K y lo sostiene el *thallium-dopado, mercuric-cuprate*, compuesto por los elementos Mercurio, *Thallium*, Bario, Calcio, Cobre y Oxígeno. La T_c de este superconductor cerámico fue confirmado por Dr. *Ron Goldfarb* en el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de Colorado, en febrero de 1994.

La primera compañía en capitalizar superconductores de alta temperatura fue Illinois Superconductor (hoy conocida como ISCO International), formada en 1989.

Mientras ningún avance significativo en la temperatura de transición de los superconductores se ha logrado en los años recientes, otros descubrimientos de igual importancia han sido hechos. En 1997 investigadores descubrieron que a una temperatura muy cercana al cero absoluto, una aleación de oro e *indium*, era un superconductor y un imán natural. Los juicios convencionales sostenían que un material con las tales propiedades no podía existir. Desde entonces, alrededor de una media docena de tales compuestos se han encontrado. En años recientes, también se han descubierto los primeros superconductores de alta-temperatura que no contienen cobre (2000), y el primer superconductor de *perovskite*, completamente de metal (2001).

También, en el 2001 un material que había estado archivado durante décadas en el laboratorio, fue descubierto para ser un nuevo y extraordinario superconductor. Los investigadores japoneses midieron la temperatura de transición del *diboride* de magnesio a 39 Kelvin -lejos del T_c más alto de cualquier superconductor de aleación o binario-. Mientras 39 K todavía esta muy por debajo de la T_c del superconductor cerámico, refinamientos subsecuentes de la forma MgB_2 se fabrican para su uso en la aplicaciones industriales.

Aunque todavía la teoría para explicar el fenómeno de la superconductividad de alta-temperatura, elude la ciencia moderna, las pistas aparecen ocasionalmente y contribuyen a nuestra comprensión de la naturaleza exótica de este fenómeno.

En el 2005, por ejemplo, Superconductors.ORG descubrió que con el aumento de las proporciones de peso de planos alternos dentro de las capas de *perovskites*, es posible aumentar significativamente la T_c . Esto ha llevado al descubrimiento de nuevos superconductores de óxido de cobre con un rango de nuevas posibilidades.

3.1.2 Descripción del fenómeno

La teoría clásica del electromagnetismo enseña que la resistencia del conductor disminuye al bajar la temperatura. Ese fenómeno puede explicarse fácilmente. La corriente eléctrica es un flujo de electrones libres que atraviesa la red cristalina del metal. A temperaturas altas, debido a la oscilación térmica de los átomos de la red cristalina, la probabilidad de colisión de los electrones con la red es grande, lo que obstaculiza el movimiento de los electrones y crea la resistencia a la corriente. A temperaturas bajas, cuando la amplitud de las oscilaciones de los átomos en la red disminuye, la probabilidad de colisión de los electrones con ésta se reduce y de esa manera la resistencia a la corriente es menor. A la temperatura de cero absoluto, estando ya la red inmóvil, la resistencia del conductor es igual a cero.

En la primavera de 1911 H. *Kamerlingh Onnes* congeló el mercurio en el frasco *Dewar* que contenía helio líquido. Luego hizo pasar a través del mercurio la corriente eléctrica y observaba las agujas de los instrumentos de medición que indicaban la resistencia que, como se esperaba, disminuía gradualmente a medida que bajaba la temperatura. Tal correlación se mantenía entre la resistencia y la temperatura hasta que ésta bajó a 4,12 K (temperatura de transición $-T_c$ -, al estado superconductor del mercurio).

Repentinamente, la resistencia eléctrica del mercurio desapareció; no quedó ni siquiera la resistencia determinada por los choques de los electrones con los defectos y las impurezas de la red. Repitiendo el experimento, tomó un mercurio muy impuro, cuya resistencia residual, provocada por las impurezas, debía manifestarse muy claramente. Más al aproximarse a la misma temperatura de 4,12 K, la resistencia del mercurio desapareció casi de la misma manera inesperada. Con un tercer intento, aumentó la longitud de la columna a 20 cm y disminuyó su sección de espesor menor que el pelo humano y al medir entonces la resistencia quedó asombrado: las agujas de los instrumentos permanecieron inmóviles. No quedando satisfecho el científico hizo de un anillo mercurio y lo suspendió horizontalmente de un hilo fino. Si en el anillo existe cierta resistencia, la corriente se amortiguará gradualmente, lo que conducirá a que la torsión del hilo disminuya y el reflejo se desplazca al inducirlo por medio de un electroimán. El científico realizó ese experimento, pero el reflejo quedó inmóvil. Y así llegó a la conclusión: “El mercurio a una temperatura próxima al cero absoluto se convierte en superconductor”.

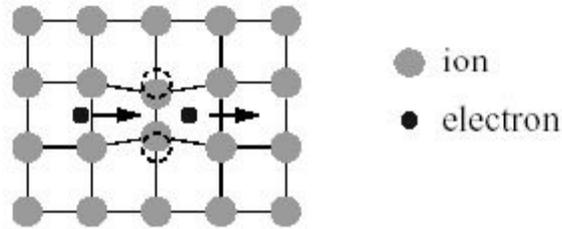
3.1.2.1 Teoría BCS

Como se induce de lo anterior, en los metales la resistividad a muy bajas temperaturas es causada por la dispersión de los electrones de conducción por las impurezas en la red⁶. Sin embargo, esta interacción de dispersión no se puede reducir a pesar de eliminar las impurezas. En un superconductor, no es necesario eliminar las impurezas de la red cristalina para conseguir sus características superconductoras.

En 1957, *Bardeen, Cooper y Schrieffer* propusieron una teoría en la que se incluyen este tipo de interacciones, es la teoría BCS.

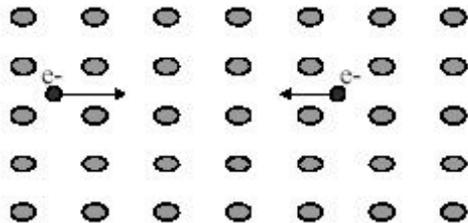
⁶ Prácticas de Física Nuclear II. Prácticas 4 y 5, www.din.upm.es/teaching/lab-fis2-web/superc/, noviembre de 2005.

Figura 21. Red de iones en un sólido



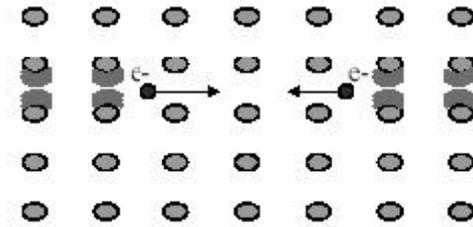
Cuando un electrón en un sólido pasa por iones adyacentes en la red, puede actuar sobre estos iones mediante un conjunto de atracciones de *Coulomb* que dan a cada uno un impulso, lo que causa que ellos se muevan ligeramente. Debido a las propiedades elásticas de la red, esta región de densidad de carga positiva aumenta y se propaga como una onda que lleva impulso a través de la red: es la emisión de un fonón.

Figura 22. Electrón viajando por una densidad de carga positiva



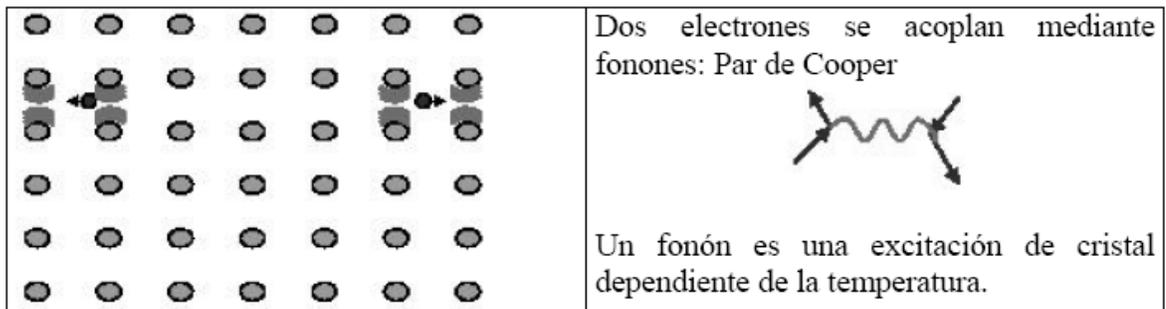
Si un segundo electrón pasa por la región en movimiento de densidad de carga positiva creciente, experimentará una interacción culombiana atractiva y así podrá absorber todo el impulso que lleva la región en movimiento.

Figura 23. Interacción entre dos electrones



El efecto neto es que los dos electrones han intercambiado algo de impulso entre ellos y han interactuado de este modo, formando un Par de Cooper: interacción atractiva entre dos electrones que vence la repulsión culombiana entre ellos. La resistividad nula se alcanza si se supone que un Par de Cooper sólo puede ser dispersado si se aporta suficiente energía como para romper el Par en dos electrones aislados.

Figura 24. Par de Cooper



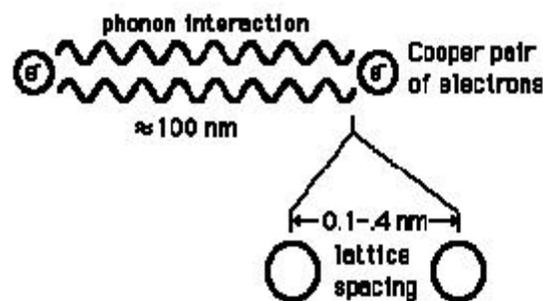
Esta interacción consta de dos pasos, incluyendo un fonón como elemento intermediario. Resultando una interacción neta atractiva entre electrones. La teoría BCS muestra que, en ciertas condiciones, la atracción entre electrones debida a un intercambio de fonones puede exceder ligeramente a la repulsión culombiana. Los electrones se mantienen unidos débilmente y formarán el llamado Par de Cooper (elementos responsables de la superconductividad).

Condiciones de formación de los Pares de *Cooper*.

- La temperatura tiene que ser lo suficientemente baja, para que las vibraciones aleatorias del cristal (fonones térmicos) no destruyan los fonones.
- La interacción del electrón con el fonón es fuerte, de modo que la sustancia que tenga una resistencia relativamente baja a temperatura ambiente, por razón de que sus electrones de conducción interactúan débilmente con las vibraciones térmicas de la red, no será un posible superconductor a bajas temperaturas.
- El número de electrones en estados justamente por debajo de la Energía de *Fermi* sea grande, ya que éstos son los electrones energéticamente disponibles para formar los Pares de *Cooper*.
- Los Pares de *Cooper* tienen que tener distancias de interacción grandes (mm) para que la repulsión coulombiana no se produzca.
- Los dos electrones que forman el Par de *Cooper* deben tener espines antiparalelos (y que por lo tanto, su función espacial sea simétrica en un intercambio de marcas).
- Al no haber un campo eléctrico externo, los dos electrones de un par tienen impulsos de igual magnitud pero de dirección opuesta.
- La superconductividad depende de las características de la red cristalina, y no de las propiedades atómicas.

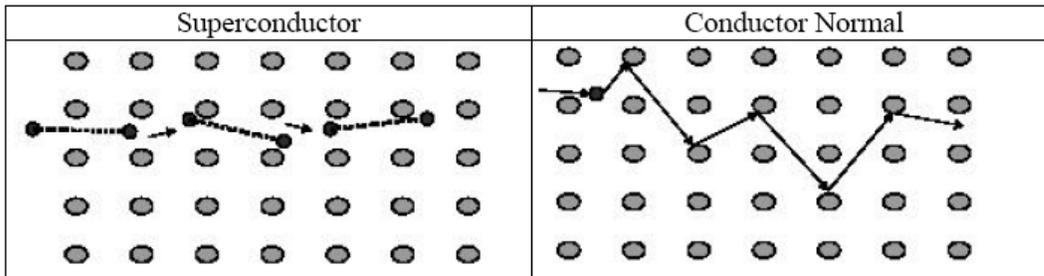
Debido a que los Pares de *Cooper* están ligados débilmente, con frecuencia se rompen para formarse nuevamente. La distancia de separación entre los electrones de un par es de aproximadamente 104 Å. Por lo tanto, dentro de la región ocupada por los electrones de un par existen muchos otros electrones que pueden participar en el proceso de formación del par. De esta manera, el sistema será más estable. El sistema logra esto manteniendo el impulso lineal nulo al no haber campo eléctrico externo.

Figura 25. Rango de alcance de la interacción por fonones del Par de *Cooper*



Cuando se aplica un campo eléctrico externo, los pares que se comportan como partículas de dos cargas electrónicas, se mueven a través de la red bajo la influencia del campo. Pero lo hacen de manera que preservan el orden ya que mantendrán su número máximo. Por lo tanto, llevarán corriente moviéndose a través de la red con todos sus centros de masa teniendo exactamente el mismo impulso. El movimiento de cada par está determinado por el movimiento de los restantes y así ninguno de ellos se puede involucrar en la dispersión producida por las imperfecciones de la red que causan una resistencia eléctrica a baja temperatura. Esta es la causa de que el sistema sea superconductor.

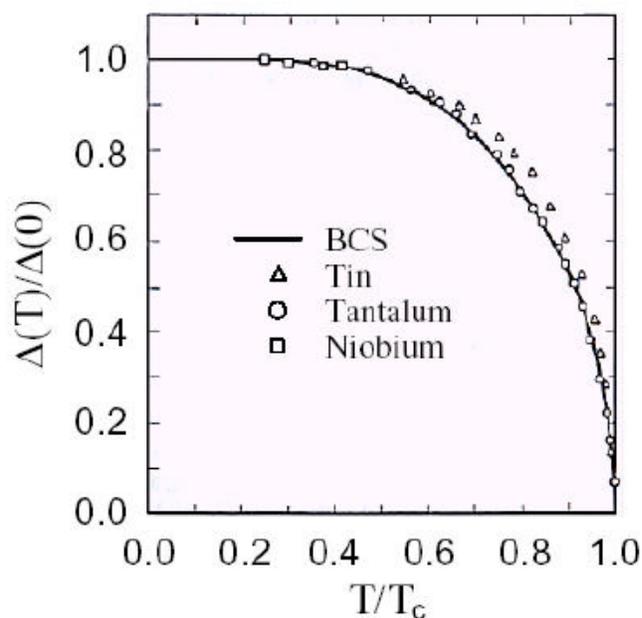
Figura 26. Comparación entre un superconductor y un conductor normal



Del resultado anterior, un Par de *Cooper* tiene menor energía que los dos electrones aislados.

Para $T < T_c$, la absorción es muy pequeña a bajas frecuencias, pero se incrementa drásticamente cuando la energía de los fotones es suficiente para excitar los electrones que forman el Par de *Cooper*.

Figura 27. Variación con la temperatura del valor de Δ comparado con su valor a 0 K

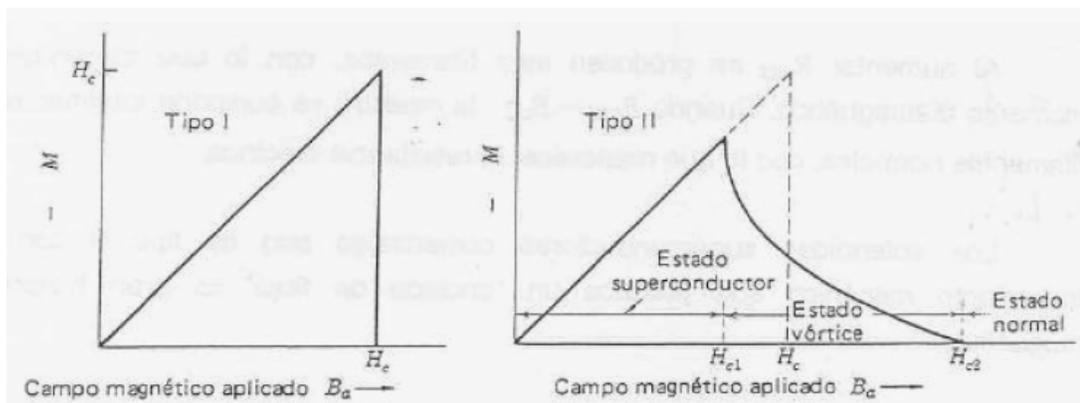


Apoyándose en el trabajo de *Frölich* (1950), los físicos *Bardeen*, *Cooper* y *Schrieffer*, trabajaron en una teoría completa de la superconductividad, descubriendo el mecanismo microscópico que daba lugar a que un metal se volviera superconductor según la interacción electrón-fonón-electrón.

3.1.3 Tipos de superconductores

Dependiendo de cómo pasan del estado superconductor al normal al aplicar un campo magnético $B_{ext} > B_c$ existen dos tipos de superconductores⁷:

Figura 28. Curvas de imanación superconductora de un superconductor tipo I y tipo II



3.1.3.1 Superconductor tipo I

Ciertos metales; en particular los que tienen bajas temperaturas de fusión y son mecánicamente suaves y de fácil obtención en un alto grado de pureza y libres de esfuerzos mecánicos internos, exhiben semejanzas en su comportamiento en el estado superconductor.

⁷ Superconductividad, www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/, noviembre de 2005.

Estos materiales superconductores reciben el nombre de superconductores ideales, superconductores Tipo I, o suaves. Estos experimentan una transición abrupta de la imanación diamagnética cuando el campo magnético externo B_{ext} supera el campo crítico B_c . El valor de B_c en este tipo de superconductores es pequeño ($\approx 10^2$ gauss); no tienen aplicación técnica en bobinas para imanes superconductores. Es un comportamiento característico de casi todos los elementos.

3.1.3.2 Superconductor tipo II

Son aquellas aleaciones y metales de transición (Nb, Tc, V), con valores altos de la resistividad eléctrica en estado normal. Particularmente con respecto a la forma cómo resultan afectados en el estado superconductor en presencia de un campo magnético. A estos superconductores se les ha dado el nombre de superconductores Tipo II, o si la superconductividad se conserva aún bajo la influencia de campos magnéticos intensos, se les conoce con el nombre de duros o de campo intenso. Estos experimentan una transición gradual de la imanación diamagnética desde un campo crítico inferior B_{c1} hasta un campo crítico superior B_{c2} . Los superconductores tipo II tienen propiedades superconductoras hasta B_{c2} ($\approx 10^5$ gauss).

Tabla II. Campo crítico superior para algunos compuestos

Compuesto	B_{c2} (T) a 4,2 K
$Pb_{0,5}Mo_{5,1}S_6$	60,3
V_3Ga	23,9
NbN	10
Nb_3Ge	36,4
Nb_3Ga	32,7

3.1.4 Propiedades de los superconductores

3.1.4.1 Efecto *Meissner-Oschenfeld*⁸

En 1933, *W. Meissner* y *R. Oschenfeld* encontraron experimentalmente que un superconductor se comporta de manera tal, que nunca permite que un campo magnético penetre en su interior. El campo magnético en el interior de un superconductor no sólo está congelado, sino que su valor es siempre cero.

Por lo que el estado de magnetización del material que pasa por la transición superconductora no depende de los pasos que se hayan seguido al establecer el campo magnético. Esta consecuencia marca también la diferencia fundamental entre lo que es un conductor perfecto y lo que es un superconductor. Por conductor perfecto se entiende como un material cuya resistencia eléctrica es igual a cero. En tanto que un superconductor, además de presentar resistencia cero, presenta también el efecto *Meissner-Oschenfeld*.

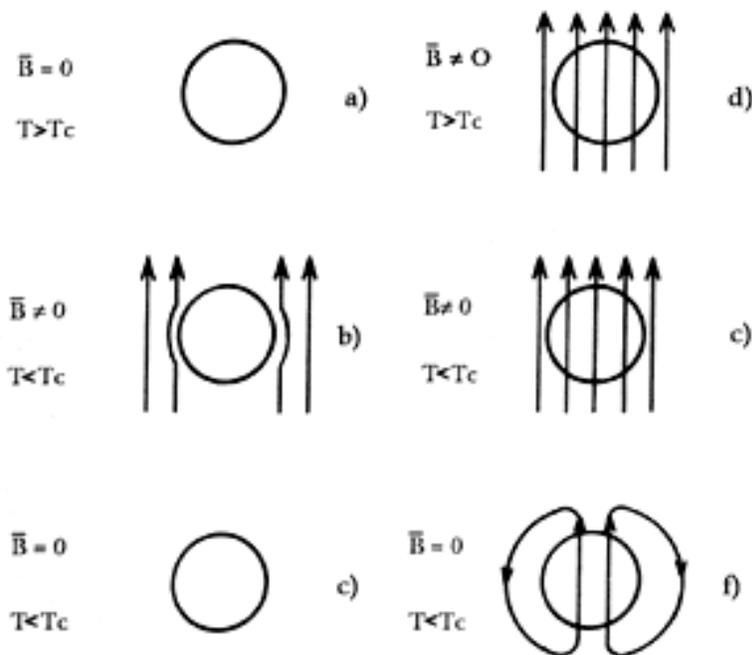
Se puede demostrar fácilmente que, en un conductor perfecto, el campo magnético tiene un valor constante, esto es, está congelado en su interior, pero no necesariamente vale cero, y esto trae como consecuencia que su estado de magnetización dependa necesariamente de los pasos, que se hayan seguido para magnetizarlo.

Para entender claramente la diferencia entre un conductor perfecto y un superconductor se presenta el siguiente ejemplo, cuando se desea magnetizar un conductor perfecto y un superconductor.

⁸ Luis Fernando Magaña Solís. Los Superconductores. (México: Fondo de Cultura Económica, 1997) pp. 27-32.

Primero un conductor perfecto; con un estado de resistencia cero sin el efecto *Meissner-Oschenfeld*.

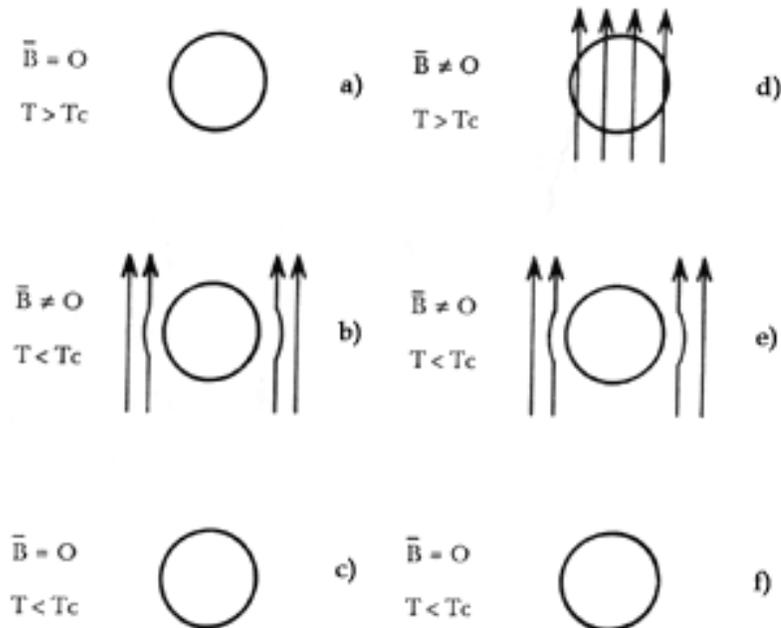
Figura 29. Penetración del campo magnético B, en el interior de un material considerado solamente como conductor perfecto (es decir que sólo presenta resistencia eléctrica igual a cero, pero no el efecto *Meissner*), al pasar por la temperatura de transición



En ausencia de un campo magnético externo, se toma la muestra a una temperatura T mayor que la temperatura de transición T_c , al estado de resistencia cero del conductor perfecto (figura 29a). Luego, se enfría la muestra a una temperatura $T < T_c$, y se introduce un campo magnético (figura 29b). En el instante en que ocurre la transición al estado de conductor perfecto el campo magnético en el interior de la muestra era cero, por lo que permanecerá con ese valor y, por tanto, el campo magnético será excluido del interior de la muestra. Finalmente, se suprime el campo magnético aplicado, manteniendo la temperatura por debajo de T_c (figura 29c). Y se obtiene que el campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo cero.

Ahora se toma la muestra nuevamente a una temperatura $T > T_c$, pero con un campo magnético externo aplicado distinto de cero (figura, 29d). Después, se enfría la muestra a una temperatura $T < T_c$ (figura 29e). El campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo el mismo que había antes de enfriarla. Finalmente, se suprime el campo magnético, aplicado (figura 29f). Lo que ahora ocurre es que se generan corrientes superficiales en la muestra, de tal modo que el campo en el interior de ella tenga el mismo valor que tenía antes de bajar la temperatura a $T < T_c$. Por lo anterior, se puede afirmar que si la transición conlleva simplemente a un conductor perfecto (esto es, a la ausencia del efecto *Meissner-Oschenfeld* en la transición), el estado de magnetización de la muestra dependerá de la manera en que se alcance el estado final. Ahora considerando que la transición, además de llevar la muestra a un estado de resistencia eléctrica cero, indica la existencia del efecto *Meissner-Oschenfeld*.

Figura 30. Penetración del campo magnético, B , en el interior de un material que es un superconductor (es decir, que presenta resistencia eléctrica igual a cero y además el efecto *Meissner*), al pasar la temperatura de transición



Ahora, tomando la muestra a una temperatura $T > T_c$ sin la presencia de un campo magnético aplicado (figura 30a). Se enfría la muestra hasta $T < T_c$, y se introduce un campo magnético (figura 30b). Por el efecto *Meissner-Oschenfeld* se inducirán corrientes superficiales en la muestra de manera tal, que el campo en su interior sea cero.

Luego, se suprime el campo magnético aplicado (figura 30c). Las corrientes superficiales desaparecen y el campo magnético en el interior de la muestra es cero.

Sin embargo, si se toma la muestra a una temperatura $T > T_c$, en presencia de un campo magnético aplicado (figura 30d). Y se enfría la muestra hasta una temperatura $T < T_c$ (figura 30e). Se tendrá que, por el efecto *Meissner-Oschenfeld*, se inducirán corrientes superficiales en la muestra de manera tal que el campo en el interior de ella sea cero.

Luego se suprime el campo externo (figura 30f), y se observará que las corrientes superficiales desaparecen y que el campo magnético en el interior de la muestra vale cero.

Por lo que se demuestra que, debido al efecto *Meissner-Oschenfeld*, el estado de magnetización de la muestra no depende de la manera en que se llegue al estado final.

Es claro que un superconductor es, además de un conductor perfecto, una sustancia en un estado en el que se presenta el efecto *Meissner-Oschenfeld*.

3.1.4.1.1 Ecuación de *London*⁹

El efecto *Meissner* ($B_{int} = 0$) es el resultado de corrientes superficiales inducidas que producen un campo que se opone a B_{ext} . Estas corrientes no pueden circular en una capa superficial infinitamente delgada, ya que entonces la densidad de corriente sería superior a la crítica, $j > j_c$ y por tanto deben penetrar ligeramente en el material. El efecto *Meissner* no se deduce simplemente de las ecuaciones de Maxwell. London demostró que es necesario introducir 2 ecuaciones adicionales. Asumiendo como hipótesis de trabajo que para $T < T_c$ sólo una fracción n_s/n del número total de e^- de conducción n participa en la supercorriente y conforme $T \rightarrow 0$, $n_s \rightarrow n$. Los e^- normales restantes, $n - n_s$, conducen la corriente con disipación de calor. Como para la supercorriente $\rho \sim 0$, esto implica que los e^- normales prácticamente no conducen corriente y por lo tanto pueden ser ignorados. Para los e^- superconductores la resistividad eléctrica $\rho \sim 0$, es decir, son acelerados en un campo eléctrico sin disipación de energía. Por tanto, la velocidad media de los e^- superconductores satisface la ecuación

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} \quad (33)$$

La ausencia de τ es debida a los fenómenos de dispersión.

La densidad de corriente de estos e^- es:

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= -en_s \mathbf{v} \\ \frac{d}{dt} \mathbf{j} &= -en_s \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{E} \end{aligned} \quad (34)$$

La ley de *Faraday-Henry* postula que

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \quad (35)$$

⁹ Superconductividad, op. cit..

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \frac{m}{n_s e^2} \frac{d}{dt} \mathbf{j} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \times \mathbf{j} + \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B} \right) = 0 \quad (36)$$

Esta última ecuación junto con la ecuación de *Maxwell* para campo estático:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (37)$$

determinan los campos magnéticos y densidades de corriente que pueden existir en un conductor perfecto. Nótese que todo campo estático \mathbf{B} está ligado a una corriente estática \mathbf{j} .

Como todo \mathbf{B} y \mathbf{j} independientes del tiempo son soluciones triviales de (36), las dos ecuaciones (36) y (37) son consistentes con un campo magnético estático arbitrario.

Esto es incompatible con el comportamiento observado en los superconductores, es decir, la desaparición del campo en el interior del superconductor para $B < B_c$ y $T < T_c$. *London* postuló que el comportamiento de los superconductores se obtiene restringiendo las soluciones de la ecuación (36) a aquellas que cumplen

$$\nabla \times \mathbf{j} = -\frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B} \quad (38)$$

La ecuación de *London* distingue a los superconductores de los “conductores perfectos”. Para éstos últimos se cumple (36), lo cual sólo es cierto si el término

$$\nabla \times \mathbf{j} + \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B}$$

es independiente del tiempo.

La ecuación de *London* es más restrictiva, requiere que el valor

$$\nabla \times \mathbf{j} + \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B}$$

independiente del tiempo sea además igual a 0.

La ecuación de *London* (37) junto con (38) lleva directamente al efecto *Meissner*, ya que

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \mu_0 \nabla \times \mathbf{j} = -\frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{B} \\ \nabla \times (\nabla \times \mathbf{j}) &= -\frac{n_s e^2}{m} \nabla \times \mathbf{B} = -\frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{j} \\ \nabla^2 \mathbf{B} &= \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{B} \\ \nabla^2 \mathbf{j} &= \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{j} \end{aligned} \tag{39}$$

La solución de las ecuaciones (39) viene dada por

$$\begin{aligned} B(x) &= B_0 \exp(-x / \lambda_L) \\ j(x) &= j_0 \exp(-x / \lambda_L) \end{aligned} \tag{40}$$

donde B_0 y j_0 son el campo y la corriente en la superficie del superconductor.

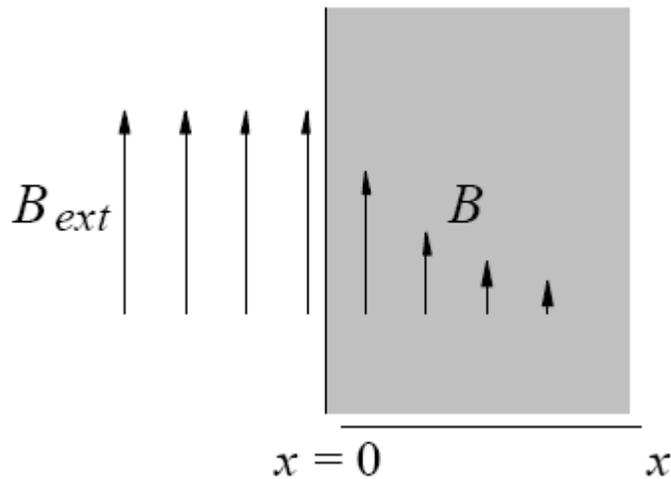
Las ecuaciones (40) predicen que las corrientes y campos magnéticos en los superconductores sólo pueden existir dentro de una capa de grosor λ_L en la superficie, donde

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}} \tag{41}$$

λ_L : profundidad de penetración de *London*.

- En un superconductor no puede existir un campo magnético uniforme, ya que $B(r) = B_0 \forall r = \text{constante}$, no puede ser solución de (39).
- En el estado superconductor, el único campo permitido se amortigua exponencialmente hacia el interior:

Figura 31. Amortiguación exponencial



En una película delgada superconductora con $t < \lambda_L$ el efecto *Meissner* no es completo, hecho que se comprueba de forma experimental. Por tanto, el campo crítico B_c en películas delgadas superconductoras es más alto que en superconductores masivos.

Los resultados empíricos demuestran asimismo que λ_L depende de la temperatura según la ecuación

$$\lambda_L = \lambda_{L0} \left(1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^4 \right)^{-1/2} \quad n_s \approx 1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^4 \quad (42)$$

3.1.4.2 La densidad de corriente

Aplicar un campo magnético intenso no es la única manera de destruir la superconductividad, una vez que el material ha sido refrigerado por debajo de su temperatura crítica. El paso de una corriente intensa a través de un superconductor también puede hacer que éste pierda sus propiedades. La cantidad de corriente que un superconductor puede soportar manteniendo nula su resistencia se denomina “densidad de corriente”, la cual se mide en amperios por unidad de área. Un valor típico de la densidad de corriente en un hilo superconductor es de 100.000 amperios por centímetro cuadrado. Si pasara una corriente más densa por el hilo, éste ofrecería resistencia.

La mayor parte de los conductores normales, como el cobre, son isótropos, es decir, conducen la corriente con igual facilidad en todas las direcciones. Con un hilo conductor ó superconductor que sea isótropo no importa cuál de los extremos del hilo se conecta al terminal positivo de la fuente eléctrica y cuál al negativo. Sin embargo, muchos de los superconductores de alta temperatura son anisótropos, es decir, conducen mejor en unas direcciones que en otras.

3.1.4.3 El efecto *Josephson*

Otra propiedad interesante de los superconductores es el efecto *Josephson*, que está basado en otro fenómeno que recibe el nombre de efecto túnel. En una unión formada por una delgada barrera de óxido colocada entre dos superconductores, se puede producir el efecto túnel. Dichas uniones pueden responder de tal manera que tengan una capacidad operativa de millones por segundo. Por esta característica pueden llegar a sustituir a los diodos y transistores clásicos en conmutación y memoria.

Las caras externas de los dos superconductores se unen entre sí y se mide la corriente que pasa a través de la unión. Cuando la unión se expone a campos magnéticos o radiación, el flujo de corriente es debido a que algunos electrones atraviesan la barrera de óxido (efecto túnel). En tal dispositivo interferente (llamado «Junción *Josephson*») los flujos de electrones, incluso en ausencia de cualquier diferencia externa de tensión, pueden pasar de un material a otro franqueando el obstáculo aislante, en cuyo seno provocan una reacción magnética de muy alta sensibilidad. Este efecto puede emplearse en circuitos de computadores, y para detectar campos magnéticos muy débiles.

Estudios muy recientes han demostrado que el efecto *Josephson* puede producirse a temperaturas muy superiores a las temperaturas críticas del material superconductor.

3.1.4.3.1 Magnetómetros superconductores¹⁰

El desarrollo de magnetómetros de alta sensibilidad por interferencia cuántica (SQUID) está basado en las uniones *Josephson* superconductor-aislante-superconductor. Éste demostró que los pares superconductores podían atravesar la zona aislante, si ésta era suficientemente delgada, por el efecto túnel con una diferencia de potencial nula. Además se mantiene la coherencia de fase en ambos lados salvo que se produciría un cambio de fase $\Delta\varphi$ al atravesar la unión. La corriente túnel tiene la forma

$$I = I_0 \sin(\Delta\varphi)$$

donde I_0 es la corriente máxima que puede atravesar la unión, sin que exista una diferencia de potencial a través de ella.

¹⁰ Ibid.

Las propiedades de estas uniones *Josephson* han sido utilizadas en varios dispositivos para medir cambios muy pequeños de flujo magnético en unidades de fluxoides. Se describe un dispositivo relativamente sencillo que demuestra el principio general de funcionamiento.

Sea un anillo superconductor que está conectado a una fuente externa mediante dos conexiones diametralmente opuestas, y que contienen 2 uniones *Josephson* X e Y idénticas, figura 33. Se hace circular una corriente I, menor que $2I_0$, de una a otra de las conexiones a través del anillo. Por cada unión, circula una corriente $I/2$ con un cambio de fase de $\Delta\varphi$. Se introduce ahora un flujo magnético en el anillo, induciéndose una supercorriente I_s en el anillo, que se sumará en X a la corriente y cambio de fase, pero que se restará en Y. Las 2 corrientes vendrán dadas por

$$\frac{I}{2} + I_s = I_0 \sin(\Delta\varphi + \delta)$$

$$\frac{I}{2} - I_s = I_0 \sin(\Delta\varphi - \delta)$$

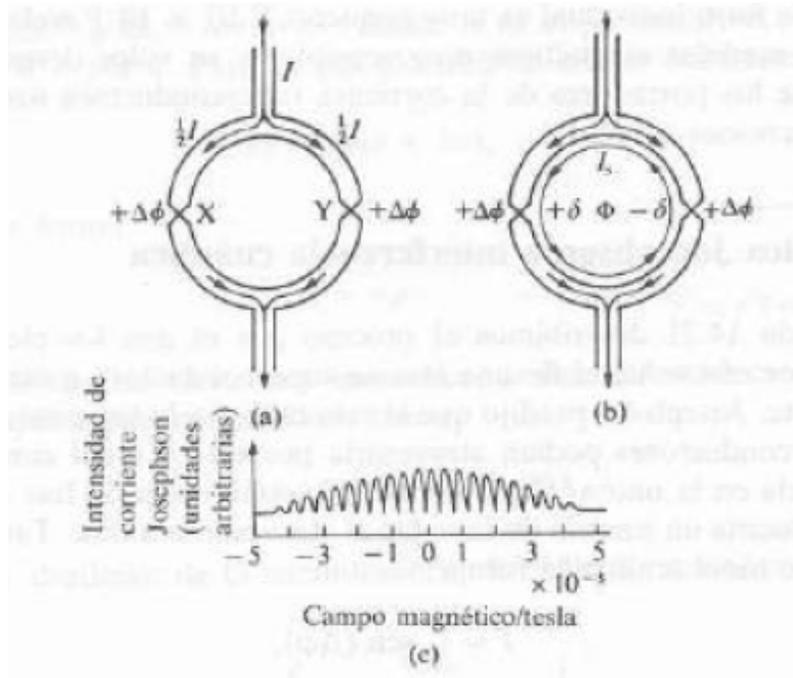
donde δ es el cambio de fase adicional introducido por la supercorriente. La corriente total a través del dispositivo seguirá siendo I definida como

$$I = I_0 \{ \sin(\Delta\varphi + \delta) + \sin(\Delta\varphi - \delta) \}$$

que se puede expresar como

$$I = 2I_0 \cos \delta \sin \Delta\varphi$$

Figura 32. a) Circuito superconductor, b) Con flujo magnético en su interior y c) Corriente en el dispositivo magnetómetro frente a campo magnético



Ahora necesitamos calcular el cambio de fase adicional δ en términos del flujo magnético del anillo. Partiendo de la ecuación

$$\frac{2m}{n_s e \hbar} \oint_R \mathbf{j}_s \cdot d\mathbf{l} - \frac{2e}{\hbar} \int_R \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = 2\pi n$$

que demuestra que el flujo de un anillo superconductor está cuantizado, y dado que el término que involucra a la integral de línea de \mathbf{j}_s es precisamente el cambio de fase debido a la corriente superconductor. Si suponemos que esta integral se toma a lo largo de un camino en el interior del superconductor, entonces \mathbf{j}_s tenderá a cero excepto en las propias uniones de manera que:

$$2\pi n - \left(\frac{2e}{\hbar} \right) \int B \cdot ds = 2\delta$$

Puesto que $\int B \cdot ds = \phi$ y dado que el flujo está cuantizado tenemos que:

$$\delta = \pi \left(n - \frac{\phi}{\phi_0} \right)$$

Con lo que la corriente a través del dispositivo es:

$$I = 2I_0 \cos \left(\pi \frac{\phi}{\phi_0} \right) \sin \Delta \varphi \quad (43)$$

La corriente máxima, y por tanto la tensión en los extremos del dispositivo de interferencia cuántica superconductora (SQUID), varía periódicamente con el flujo magnético con un período de un fluxoide, 2.7×10^{-15} Wb.

Los SQUID, fueron unas de las primeras aplicaciones comerciales de la superconductividad. Basado en las uniones Josephson, son captadores magnéticos extraordinariamente sensibles que permiten medir campos magnéticos y tensiones eléctricas increíblemente débiles. Estos llevan utilizándose ininterrumpidamente desde los años 60 en multitud de aplicaciones: detección súper precisa de las señales eléctricas del cerebro y el corazón, comprobación no destructiva de tuberías y puentes (la fatiga del metal produce una firma magnética peculiar), paleomagnetismo, sensores geológicos para prospecciones petrolíferas, equipos militares de detección de sumergibles y demás aplicaciones.

3.1.4.4 El efecto de proximidad

Este efecto ya había sido descubierto por *Cooper* en 1961, consiste en que las propiedades superconductoras de las películas metálicas pueden verse seriamente afectadas por el contacto directo con otros metales: si tenemos capas delgadas de material superconductor depositadas sobre un metal en estado normal podrían pasar al estado normal a pesar de estar a una temperatura inferior a la temperatura crítica y en ausencia de un campo magnético. Recíprocamente, si se tienen capas delgadas de material en estado normal depositadas sobre un material en estado superconductor podrían pasar al estado superconductor.

Los primeros experimentos que verificaron la existencia del efecto de proximidad fueron realizados por *Meissner* entre 1958 y 1960, quien encontró que una película de cobre depositada sobre estaño (encontrándose el estaño en estado superconductor) se volvía superconductora.

El argumento intuitivo para justificar la aparición del efecto de proximidad puede expresarse de la siguiente manera. Como explicó *Cooper* en 1961, es necesario distinguir entre el alcance de la interacción atractiva entre electrones y la distancia sobre la cual, como un resultado de la interacción, los electrones están correlacionados en pares de *Cooper*. El alcance de la interacción atractiva es muy corto, del orden de 1 *angstrom* (del orden del tamaño de la celda unitaria en la red cristalina). La distancia de correlación para los pares de *Cooper* es del orden de 10^4 *angstrom* (o 10^{-4} cm). En virtud de esta longitud de coherencia grande para los pares de *Cooper*, éstos pueden extenderse considerablemente dentro de una región en la cual la interacción entre electrones no es atractiva.

Así, cuando una película delgada de material superconductor está en contacto con una película delgada de material en estado normal, la formación de pares de *Cooper* puede extenderse a ambas capas. Es interesante hacer notar que las teorías existentes sobre el efecto de proximidad solo dan una concordancia cualitativa con los resultados experimentales.

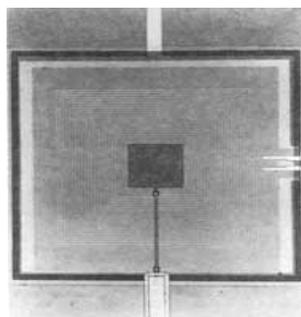
También hay bastantes dificultades en lo que se refiere a la parte experimental del efecto de proximidad. Por una parte, es difícil obtener a nivel microscópico fronteras bien definidas entre los metales. Depositar películas delgadas a la temperatura ambiente puede llevar a que se produzca algo de difusión de un material en el otro y la formación de aleaciones si los materiales no se seleccionan adecuadamente. Por otra parte, depositar películas delgadas a bajas temperaturas dificulta mucho la determinación precisa del espesor de ellas.

3.1.5 Algunas aplicaciones

3.1.5.1 El SQUID: dispositivo superconductor de interferencia cuántica

Como ya se mencionó, fue una de las primeras aplicaciones comerciales de la superconductividad. Basado en las uniones *Josephson*.

Figura 33. SQUID



3.1.5.2 El RMN: dispositivo de formación de imágenes por resonancia magnética

Con esta técnica se coloca una sustancia en un campo magnético intenso que modifica el spin de los núcleos de determinados iones. Después, se somete la muestra a una onda de radio que reorienta los núcleos. Al desaparecer la excitación se libera un pulso de energía que proporciona información sobre la estructura molecular de la sustancia y que puede transformarse en una imagen mediante técnicas informáticas. El RMN es una herramienta casi indispensable para la formación de imágenes del cerebro, y con el advenimiento de los superconductores de alta temperatura, podrá convertirse en una máquina mucho más pequeña y barata; los superconductores clásicos enfriados por helio requieren voluminosos y delicados equipos de refrigeración. En cambio, el nitrógeno líquido es sencillo de producir y utilizar.

Figura 34. RMN



3.1.5.3 Ordenadores

Otra aplicación de las uniones *Josephson* es la posibilidad de fabricar transistores basados en ellas. Estos circuitos podrían activarse y desactivarse muy rápidamente con un consumo de potencia mínimo. En teoría, un ordenador basado en el efecto *Josephson* sería 50 veces más rápido que uno convencional, aunque hasta hoy no ha sido construido debido a problemas de fiabilidad, de interfaces y a la dificultad de competir con un adversario tan poderoso como los circuitos de silicio (mucho más económicos y sencillos de utilizar).

3.1.5.4 Campos magnéticos intensos

La forma más evidente de crear un campo magnético es mediante una bobina de cable enrollado, que al ser atravesada por una corriente eléctrica crea un campo directamente proporcional a la intensidad de la misma. Pero el campo máximo que se puede generar no es muy grande, ya que al incrementar la corriente los cables comienzan a calentarse peligrosamente debido a la resistencia eléctrica. Con los superconductores no pasa esto: su resistencia es cero y pueden producir grandes campos magnéticos. La aplicación típica en este caso son los aceleradores de partículas como el Tevatron del Fermilab en EE.UU. con una capacidad de un teraelectrón voltio (TeV), equivalente a un billón de voltios.

3.1.5.5 Imanes basados en superconductores de alta temperatura

Ya se pueden conseguir imanes de cerámicas superconductoras que pueden generar un campo de dos teslas, cinco veces mayor que el que se puede conseguir con un imán permanente. Estos imanes se utilizan por ejemplo en los trenes de alta velocidad sobre cojín magnético (MAGLEV). Los trenes tipo SED (suspensión electrodinámica) japoneses pueden desplazarse de 320 a 500 Km/h mediante imanes superconductores que inducen corrientes en las bobinas conductoras de las guías. Esta interacción eleva al vehículo unos 15 cm del suelo.

Figura 35. Tren superconductor



3.1.5.6 Cables superconductores¹¹

Actualmente, un cable superconductor necesita de una cubierta refrigerante a su alrededor para mantenerlo a una temperatura inferior a la temperatura crítica del material que lo forma.

Es evidente que si se dispusiera de un superconductor que trabajara a la temperatura ambiente (o mayor) el sistema de refrigeración no sería necesario. Claro que si se tuviera un elemento conductor fabricado con los nuevos materiales cerámicos, el sistema de refrigeración se simplificaría muchísimo en su diseño y disminuiría mucho su costo de fabricación.

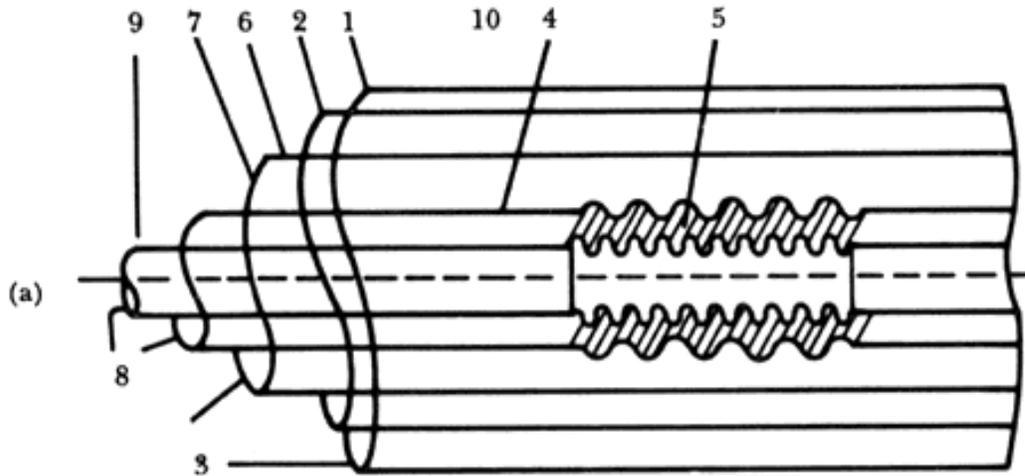
Puede hacerse, a grandes rasgos, una distinción entre las características de los cables superconductores a partir de sus componentes: el aislamiento térmico y el sistema conductor eléctrico.

Por otro lado, con respecto a la construcción mecánica, se tienen tres tipos de cables superconductores:

1. Rígidos. El aislamiento y el conductor se fabrican con tubos rígidos. Una de las dificultades principales de este diseño es que la longitud máxima de manufactura transportable es de 20 metros aproximadamente, de lo que resulta un gran número de uniones. Se requieren, además, componentes corrugados para compensar las contracciones térmicas.

¹¹ Luis Fernando Magaña Solís, op. cit., pp. 85-89.

Figura 36. Tipo de cable superconductor llamado rígido

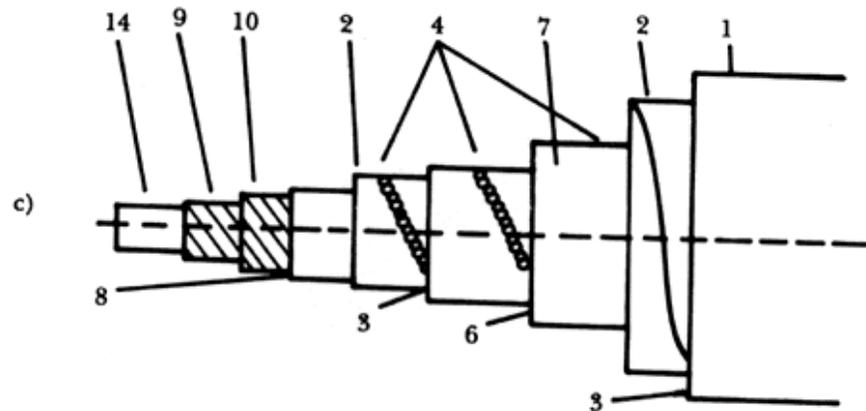


Sus componentes son:

1. Tubo de protección
2. Superaislamiento
3. Vacío
4. Espaciadores
5. Fuelles
6. Nitrógeno líquido
7. Escudo frío
8. Helio líquido
9. Superconductor
10. Aislamiento eléctrico
11. Escudo frío
12. Retorno de helio
13. Tubo de helio
14. Soporte

2. Semiflexibles. En este caso también el sistema de aislamiento térmico consta de tubos rígidos con componentes corrugados para compensar las contracciones térmicas. Sin embargo, el conductor es flexible y puede consistir de un tubo corrugado, o de alambres doblados en forma helicoidal sobre un soporte cilíndrico hueco. Estos cables superconductores pueden fabricarse en longitudes de 200 a 500 metros y ser transportados en tambores.

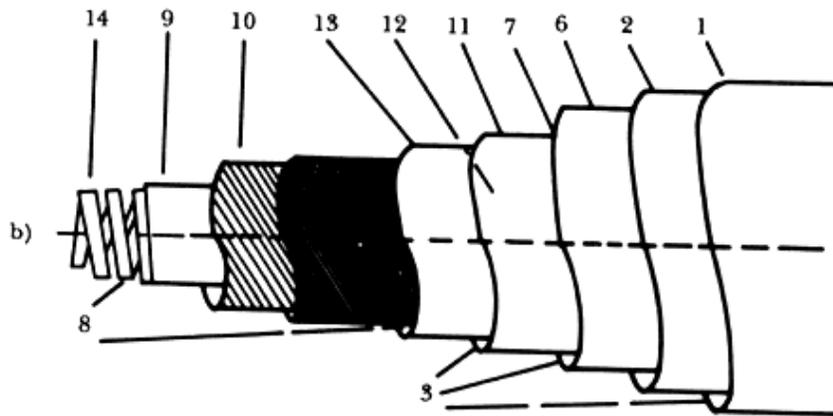
Figura 37. Cable superconductor del tipo semiflexible



(Los componentes a que se refieren los números son los mismos que los de la figura 36)

3. Completamente flexibles. En este tipo de cable el aislamiento térmico también es flexible. El cable está construido con tubos corrugados, de manera que no hay problemas con respecto al transporte o a las contracciones térmicas. El conductor puede ser, otra vez, un tubo corrugado o alambre doblado en forma helicoidal.

Figura 38. Cable superconductor del tipo completamente flexible



(Sus componentes son los mismos que los de la anterior figura 36)

3.1.5.7 Limitadores de corriente (superconductores)¹²

El concepto más sencillo de un limitador de corriente superconductor es el resistivo. En esta configuración, el material superconductor se conecta en serie en la línea a proteger. El superconductor se diseña para que la corriente nominal de la red sea inferior al valor de la corriente crítica. De esta forma la interferencia del superconductor en la línea es despreciable en condiciones normales de trabajo.

Cuando se produce un cortocircuito la corriente eléctrica supera el valor crítico y el material transita al estado resistivo. Con ello la impedancia en el circuito aumenta rápidamente y la corriente máxima que se alcanza es bastante inferior a la corriente de cortocircuito. La situación óptima se produciría con un material superconductor muy largo.

¹² Aplicaciones de la superconductividad para una electricidad más segura, [http:// www.aragoninvestiga.org/investigacion](http://www.aragoninvestiga.org/investigacion), noviembre de 2005.

En este caso, como la resistencia que es capaz de generar un material es proporcional a su longitud, lograríamos que la limitación fuera efectiva en cuanto la corriente superara ligeramente el valor de corriente crítica. En este contexto diferentes grupos de investigación y empresas han desarrollado materiales superconductores con geometrías que permiten obtener muestras con longitudes superiores al metro.

Figura 39. Diseño de un elemento basado en una doble hélice sobre un tubo de material superconductor con el objeto de ser utilizado en un limitador de corriente superconductor



Un segundo diseño de limitador de corriente superconductor es el que se conoce como inductivo. En este caso el limitador de corriente es un transformador en el que el primario es una bobina metálica a la que se conecta la red y que está acoplada con un secundario superconductor cortocircuitado. En condiciones normales el secundario está en estado superconductor que es capaz de compensar el campo magnético creado por el primario. En cambio al producirse el cortocircuito, el material superconductor pasa al estado resistivo y cambia completamente el acoplamiento del transformador incrementando la impedancia del sistema y limitando la corriente.

El principal problema es conseguir muestras superconductoras con los tamaños requeridos. Generalmente son necesarios cilindros o anillos con diámetros en el orden de 50 a 70 centímetros. Existen otros diseños que se han llamado híbridos. En ellos el secundario del transformador se fabrica con una bobina metálica normal, pero que está cortocircuitada a través de un material superconductor. En estado normal, el superconductor no presenta resistencia, mientras que al producirse el cortocircuito la impedancia del secundario aumenta porque el superconductor empieza a generar resistencia. Otro aspecto importante de un limitador de corriente superconductor es que una vez que se ha producido la limitación el sistema puede volver por sí solo de nuevo al estado superconductor sin necesidad de ninguna intervención externa. Usualmente este tiempo puede llegar a ser de unos pocos segundos aunque se está trabajando intensamente en reducir este tiempo todo lo posible.

3.1.5.8 SMES: superconductores magnéticos de almacenamiento de energía

Este sistema consiste en "cargar" una bobina superconductora de electricidad y luego cerrarla formando un anillo. La corriente teóricamente circularía sin pérdidas, y cuando hubiera que utilizarla, bastaría con abrirla y extraer la cantidad necesaria. Este sistema se ha propuesto, por ejemplo, para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos.

3.1.5.9 Investigación espacial

En el espacio, protegidos de la luz solar, es fácil conseguir temperaturas dentro del rango funcional de los superconductores de alta temperatura. En este aspecto la NASA ha financiado diferentes estudios sobre sensores y elementos de actuación electromecánicos con vistas a su utilización en naves espaciales.

4. LOS SUPERCONDUCTORES EN LA ACTUALIDAD

4.1 Empresas dedicadas a la investigación y manufactura de superconductores

1. ULTERA (NKT Cables y SOUTHWIRE)
2. SUPERCABLE
3. ORNL
4. AMERICAN ELECTRIC POWER COMPANY (AEP)
5. SUMITOMO y FURUKAWA DE JAPON
6. LG CABLES en Korea
7. CONDUMEX En México
8. AMERICAN SUPERCONDUCTOR CORPORATION
9. NORTHROP GRUMMAN MARINE SYSTEMS
10. PRISMIAN
11. GENERAL CABLE
12. PIRELLI
13. Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC-Universidad de ZARAGOZA)

Cada una de las empresas listadas forman el conjunto de vanguardia en el campo de la fabricación y venta de materiales superconductores. Sabiendo que el desarrollo de la ciencia en esta rama aún inicia, y que los frutos de esta nueva tecnología se verán en algunas decenas de años, poco a poco se vislumbra el enorme potencial de la misma.

La empresa ULTERA, unión integrada desde 1998 por NKT CABLES de Dinamarca y SOUTHWIRE Carrollton, Ga., EE.UU, tiene más de cinco años de experiencia en la operación e instalación de cables HTS, en sistemas que proporcionan potencia a usuarios finales en Estados Unidos y Dinamarca. Y es la responsable de varios éxitos en la instalación de cables HTS a nivel mundial. Por lo que la mención de su experiencia en este campo es de suma importancia en el presente trabajo.

4.2 La experiencia de la empresa ULTERA

4.2.1 El desarrollo exitoso de un cable conductor HTS de 3.0 kA (Agosto 11 de 2003)¹³

4.2.1.1 Contenido

Ultera ha enfocado una parte del esfuerzo de la investigación en el diseño, construcción y prueba de cables conductores de baja-pérdida, basados en materiales superconductores de alta-temperatura (HTS). Esto produjo en 1999 un record mundial en baja pérdida de 0.6 W/m a 2 kA(rms), 50 Hz, por la investigación de NKT. Esto fue suficiente para impulsar el proyecto de 30 metros de cable superconductor en la subestación de AMK en Copenhague. La prueba de Copenhague fácilmente proporcionó potencia a 50,000 usuarios durante aproximadamente dos años. Ahora existe un proyecto de demostración más largo en Columbus, Ohio. Este proyecto fue comprendido en colaboración con la compañía American Electric Power (AEP).

4.2.1.2 Requerimientos del proyecto de AEP

Para la demostración de AEP, se diseñó un cable de 300 m para el sistema. Las cargas máximas en el período de verano, se esperan que alcance 3.0 kA rms por el verano del 2007. Éste es un aumento significativo, comparado a los 2.0 kA del proyecto de Copenhague y los 1.25 kA del proyecto de Carrollton. Además, la corriente máxima en el proyecto de AEP es de 30 kA, casi por un factor de dos para los niveles de Copenhague de 16 kA, y más de un factor de dos para Carrollton de 13 kA.

¹³ ULTERA, a Southwire / nkt cables Joint Venture, <http://www.ultera.net/documents>, diciembre de 2005.

4.2.1.3 La exitosa prueba del conductor de 3 kA

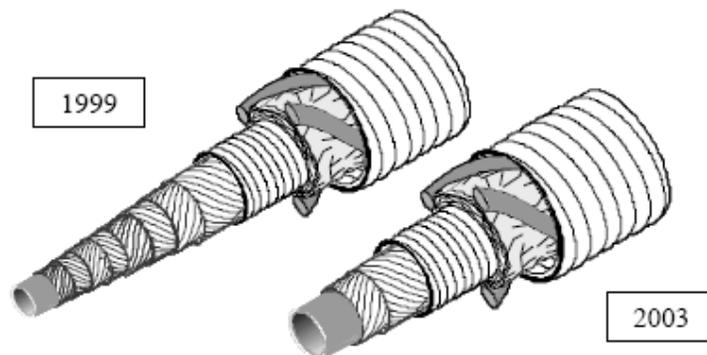
Dos factores principales han hecho posible la realización de un conductor de 3 kA. El primero, es un mejoramiento en la selección del ángulo del diapasón y del diámetro en el cable conductor. El segundo, por el uso de cintas de altas corrientes HTS.

Hoy cada cinta es capaz de transportar de 100 a 130 A, comparado con los 30 a 50 A de las cinta de antes.

Ultera ha trabajado íntimamente con el proveedor de sus materiales la empresa American Superconductor Co (AMSC), para obtener las cintas de HTS con las propiedades globales convenientes para este objetivo.

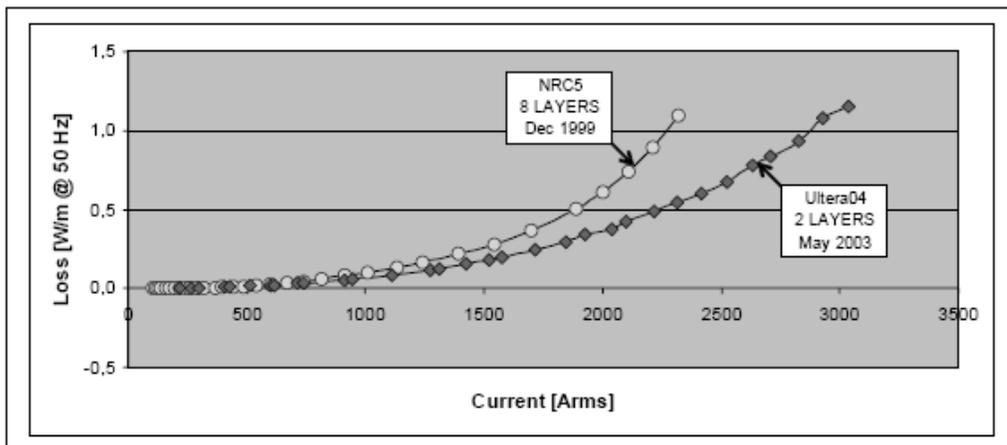
Por medio de estas mejoras, ha sido posible fabricar un conductor de 3 kA de solo dos capas de cinta de HTS, donde el cable viejo de 2 kA estaba usando ocho capas de cinta de HTS, figura 40.

Figura 40. El cable conductor de 3 kA fabricado y probado en abril-mayo de 2003, usando sólo dos capas de cinta HTS, comparado al mejor conductor de ocho capas de 1999



El conductor era manufacturado por Ultera, y probado por Oak Ridge National Lab (ORNL) a una frecuencia de 60 Hz. En figura 41, los resultados se han ordenados en la escala de 50 Hz para compararlos con los mejores resultados de antes.

Figura 41. Los resultados de un cable conductor de 3 kA HTS hecho de dos capas de cintas de HTS, comparado con los mejores resultados anteriores de un conductor de 2 kA de 1999, donde se usaron ocho capas de cinta HTS



4.2.1.4 Las implicaciones de estos resultados

Tres kiloamperios en operación, significan que más usuarios pueden ser suplidos por un solo cable, o el mismo número de usuarios pueden ser suplidos por un más bajo nivel de voltaje. Esto da una nueva herramienta útil para proyectistas con el fin de simplificar su red y para relocalizar los transformadores no deseados.

Esto es una gran simplificación en la construcción del cable, reduciendo el costo, y la construcción del producto.

4.2.2 Realización de la demostración de un supercable a la subestación de AMK en Copenhague. Una prueba de dos años exitosa de un supercable en la red pública (septiembre 18 de 2003)¹⁴

4.2.2.1 Descripción del proyecto demostrativo de un supercable

4.2.2.1.1 El propósito

El propósito del proyecto fue instalar y operar un sistema de cable superconductor, sistema bajo condiciones reales en la red eléctrica de Dinamarca.

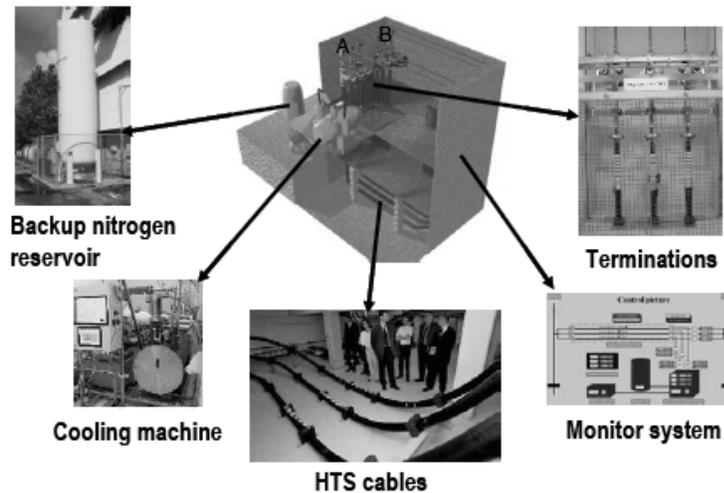
4.2.2.1.2 Descripción de la instalación

La instalación de Supercable consistió de cuatro componentes:

- 1) El sistema refrigerante y un depósito de apoyo
- 2) Cables flexibles HTS con RTD (Room Temperature Dielectric)
- 3) Terminaciones
- 4) El sistema de vigilancia

¹⁴ Ibid.

Figura 42. Las imágenes de los cuatro componentes del sistema de supercable



4.2.2.1.3 Descripción del cable superconductor

El sistema de cable superconductor se desarrolló en el período de 1998-2000, y se finalizó en el 2001. Fue seleccionado por Supercable para mostrarlo y fue llamado "*Room Temperature Dielectric*" (RTD). Éste es un cable con una estructura convencional de aislante de poly-etileno.

Desde que el cable no calienta, no es necesario unir el poly-etileno durante la construcción. Esto significa que el proceso de la construcción es más rápido que para los cables convencionales. El enfoque del desarrollo del cable estaba en el cable conductor, y cómo lograr y medir la baja pérdida eléctrica. Esta meta se logró usando 8 capas de cintas superconductoras colocadas en un centro flexible. De esta manera, 2.0 kA rms podrían ser transportados con una pérdida eléctrica por debajo de 0.6 W/m.

El cable fue construido y probado para un radio de curvatura de 1.5m, y una fuerza tirante de 2 toneladas.

Figura 43. Ajustando los ángulos de las cintas de HTS en las 8 capas, la corriente puede estar distribuida con precisión en el cable conductor



Tabla III. Rangos del sistema de cables en AMK.

Rated voltage	36	kV
Operating voltage	30	kV
Rated current	2000	A
Operating current	0-1200	A
Rated power	124	MVA
Installed rated power	104	MVA
Operated power	0-60	MVA

4.2.2.1.4 Resultados de dos años de prueba

4.2.2.1.4.1 Datos del funcionamiento

El sistema de cables superconductores fue energizado el 28 de mayo del 2001, en la subestación AMK de 132/30 kV en Amager, sur de Copenhague.

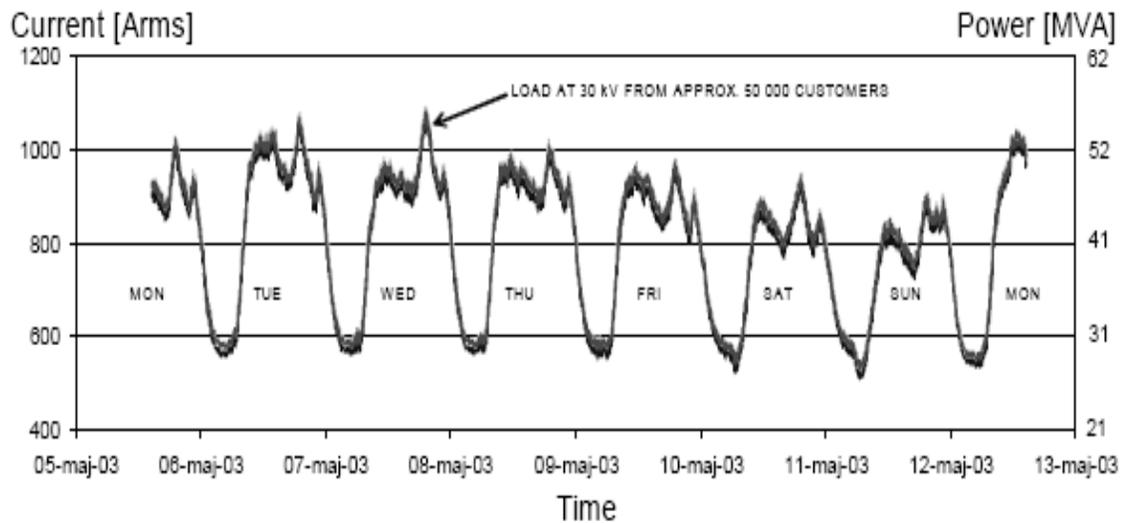
Se convirtió en el primer cable superconductor de alta-temperatura (HTS) a ser operado en una red, sirviendo a múltiples clientes, sólo un año después de la primera demostración industrial que energizó la planta de Southwire en Carrollton, GA.

Supercable estaba llevando a cabo pequeños pasos en un acercamiento conservador, para construir la confianza con el personal que opera en la compañía de energía de Copenhague.

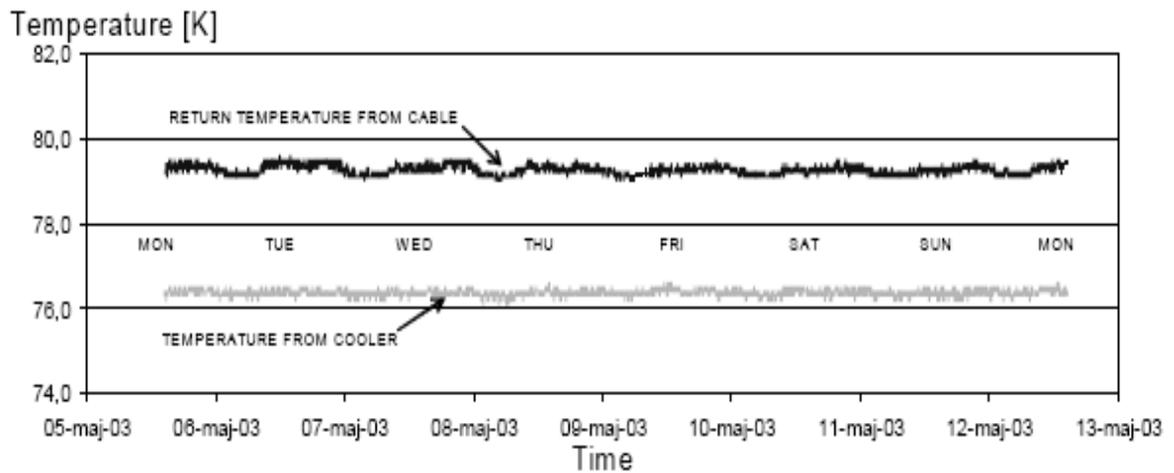
Los cables HTS y las terminaciones operaron establemente bajo todas las condiciones de funcionamiento normal en la subestación.

El sistema de vigilancia registró todas las sucesiones del funcionamiento normales con precisión, y todos los eventos que ocurrieron durante el período de la prueba.

Figura 44. a) Diagrama de la carga eléctrica transportada por el cable HTS en el período del 5-12 mayo, 2003, mostrando las fluctuaciones en la carga durante la semana y el día. b) Diagrama de la entrada y toma de corriente a las temperaturas que operan por encima del período de una semana, mostrando un funcionamiento estable del sistema refrigerante AMK. El cable fue operado a un rango de temperatura de 76.5 a 79.5 K (-196 a -193 C), en este período

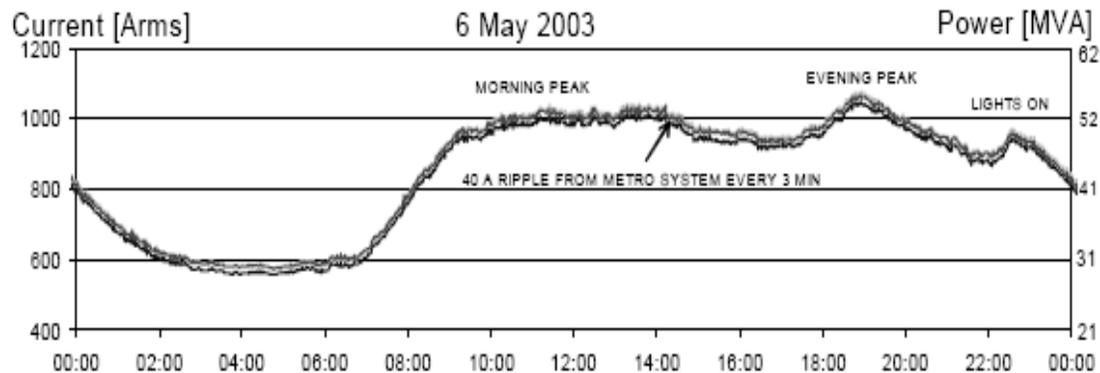


a)



b)

Figura 45. Detalle del 6 de mayo que muestra la onda de carga causada por el sistema metropolitano de Copenhague



El 12 de mayo del 2003, el sistema de cables HTS fueron desmontados, después de un período de prueba completo de 2 años. Las siguientes conclusiones principales pueden hacerse de este período:

1. Los cables HTS y sus terminaciones funcionaron según los planes, a una potencia de 60 MVA.
 - La corriente máxima de operación estaba limitada por la temperatura más baja que pudo mantenerse por el sistema refrigerante.
 - La carga máxima normal de AMK era de 1200A en el período invernal.
2. El sistema refrigerante no mostró la fiabilidad y facilidad de servicio requeridas para un continuo funcionamiento.
 - Varios componentes necesitaron ajustes.
 - El sistema refrigerante de agua funcionó mal inesperadamente.
 - Vibraciones demasiado grandes para la fiabilidad a largo plazo.
 - Las experiencias obtenidas se usarán para mejorar los refrigeradores futuros.

3. El sistema de vigilancia era adecuado para el funcionamiento y protección del sistema de cables HTS
 - Número mínimo de sensores y criterio de la alarma para aumentar la fiabilidad.
 - Más sensores podrían simplificar el servicio y análisis.

En el período de prueba de 17.135 h, el sistema se refrigeró en 16.036 h y operó con la carga 11.491 h. El sistema entregó 226 GWh de energía eléctrica a aproximadamente 50.000 usuarios en la isla de Amager, justo al sur de Copenhague.

Tabla IV. Datos de operación del período de prueba de 2 años en AMK, Copenhague

Start operation period	28 May 2001, 15:45 h
End operation period	12 May 2003, 14:40 h
Delivered energy	226 GWh
Number of hours in the operation period	17.135 h
- of which in operation (cooled)	16.036 h
- of which loaded	11.491 h
Maximum load current	1157 A (30 Jan 2003)
Largest instantaneous load jump	~800 A (28 Jan 2003)
Fault current event	5800 A for 7 cycles (18 Oct 2001)

4.2.2.1.4.2 Experiencias de servicio y reparación

En el curso de prueba de los dos años, se registraron 31 períodos sin carga. Fuera de éstos, 16 fueron debido a eventos inesperados y alarmas, 14 períodos fueron debidos a los servicios planeados y pruebas (en su mayor parte), involucrando modos diferentes del funcionamiento del sistema refrigerante principal.

Un solo período fue debido al trabajo de la reparación para remediar un error de construcción en el sistema refrigerante. En este período, el sistema entero del cable se calentó sin la carga en un período de 7 semanas. La duración para una excursión, siguiendo una alarma, estaba en el promedio 73 h (3 días).

Tabla V. Estadísticas de servicio y alarmas en el período de prueba de 2 años en AMK, Copenhague

Number of periods without load	31
- faults/alarms	16
- planned service/tests	14
- repair (warm)	1
Total time without load	5.646 h
- faults/alarms	1.161 h
- planned service/tests	3.386 h
- repair (warm)	1.099 h
Duration of an outing (average)	
- faults/alarms	73 h (3 days)
- planned service/tests	242 h (10 days)

4.2.2.1.5 Desmontaje de los supercables

El desmontaje de la tres fase de supercables se preparó durante dos semanas, con una semana para el levantamiento del sistema refrigerante, y una semana para el desmontaje de las terminales, equipo de medida y aisladores de apoyo. El desmontaje de los cables tardó 55 min, 45 min, y 35 min, para cada una de las tres fases respectivamente. El desmontaje correspondió estrechamente al manual “Marcha atrás de la instalación” de dos años antes, con la diferencia principal que la instrumentación de los cables consumía más tiempo que remover la instrumentación.

Figura 46. Los supercables se desmontaron el 16 de junio de 2003, después de 2 semanas de remover el sistema refrigerante, terminales, y equipo de medida. Los tres cables fueron removidos con una diferencia de tres horas



4.2.2.1.6 Aprovechamiento de los resultados

Las experiencias de los 2 años del período de prueba se usarán en la aventura de unión Ultera™ que se ha establecido entre el grupo de cables de NKT y Southwire Co para desarrollar, fabricar, y comercializar la tecnología de Supercable. La red de socios consiste en la oficina de desarrollo de Ultera en Dinamarca, la oficina de Ultera en Carrollton, GA, NKT cables en Alemania y Dinamarca, Southwire Co y Oak Ridge National Laboratory (ORNL) en EE.UU., la Universidad Técnica de Dinamarca, DTU Oersted, DEFU, y las compañías involucradas.

Otro proyecto muestra un supercable de 300 m de largo de American Electric Power (AEP) en Columbus, Ohio. Este proyecto fue apoyado por el Departamento de Energía de los EE.UU. que dará el 50% de los materiales y 100% apoyo al trabajo de desarrollo de ORNL.

Figura 47. Se preparan los tres supercables de prueba de Copenhague para el transporte a DTU Oersted, dónde pasarán por un procedimiento de prueba de post-funcionamiento



Figura 48. El equipo de NKT Cables que realizó el montaje y desmontaje del sistema de demostración de supercables en la subestación de AMK, Copenhague



4.2.3 Cable Triaxial superconductor de potencia (octubre 15 de 2003)¹⁵

4.2.3.1 Diseño del cable Triaxial

Ultera está trabajando en desarrollar un nuevo e interesante diseño del conductor que promete reducir el costo actual del material, además de reducir los requisitos del refrigerante y aumentar la eficiencia de la energía.

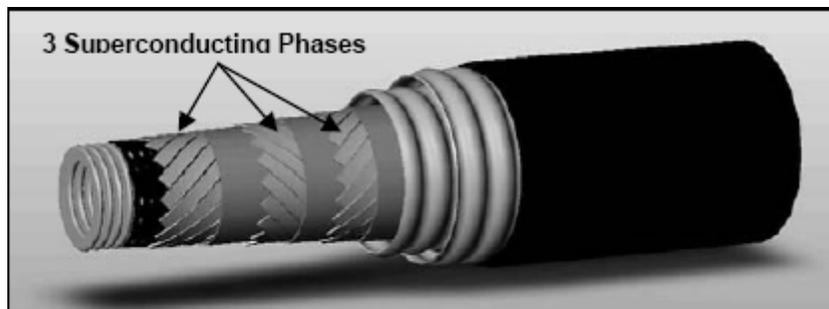
¹⁵ Ibid.

El nuevo diseño del conductor Triaxial coloca a los tres conductores de las fases de forma concéntrica alrededor de un eje común.

Este concepto reduce la cantidad de alambre necesario de HTS, y reduce el área de la superficie fría, por lo que se reducen los requisitos refrigerantes. La cancelación del campo eléctrico se logra por la separación de las tres fases concéntricas 120 grados eléctricos. Un escudo común de cobre se usa para llevar las corrientes neutrales.

Este nuevo diseño, es un paso significativo para reducir el costo del sistema, logrando un producto viable comercialmente. El diseño Triax dirige el costo a dos componentes dentro de un sistema de cable superconductor: Los alambres de HTS y la refrigeración.

Figura 49. Cable superconductor Triaxial de 3 fases superconductoras



El primer prototipo a gran escala del diseño del Triax fue construido, probado y desarrollado por Ultera con el acompañamiento de Oak Ridge National Lab (ORNL) durante el otoño del 2002. Las tres fases concéntricas se conectan a las guías de cobre que continúan a lo largo de la longitud de la terminal.

Las tres conexiones de las fases se muestran al lado derecho de la terminal, mientras el *bushing* neutro está oculto en el lado de la parte de atrás del cuerpo de la terminal. La terminal del Triax es un diseño pequeño en el cuerpo de la terminal y no es más grande que el diámetro del cable Cryostat.

4.2.4 La comprobación exitosa de un cable de 3 x 3.0 kA Triax HTS (diciembre 5 de 2003)

4.2.4.1 Contenido

La demostración de la subestación de Bixby (AEP, Columbus, OH) requiere un cable de tres fases de 13.2 kV. El requerimiento de corriente máxima, incluyendo el crecimiento de la carga en el período 2003-2007, se prevé en 3.0 kA.

Southwire Co. ha demostrado un sistema de 1.3 kA/15 kV en Carrollton, y NKT cables un sistema de 2 kA/36 kV en Copenhague. En los último año, se ha enfocado en actualizar la tecnología del conductor a 3.0 kA, y para incorporar este rango en el nuevo diseño Triaxial.

4.2.4.2 El equipo de prueba

El modelo del cable de tres metro, fue fabricado en Carrollton, usado por Ultera en la línea de fabricación. Fue probado por el equipo de Ultera en la Universidad Técnica de Dinamarca en Copenhague, figura 51. El equipo de prueba recrea las condiciones medioambientales de presión y temperatura en una longitud larga del cable superconductor del sistema. Se usaron las frecuencias de 60 Hz y 50 Hz de orden para simular las condiciones de EE.UU. y Europa.

Esto fue posible por el motor-generador de tres fases suministrando potencia, y los transformadores de alta corriente disponibles en el laboratorio de prueba.

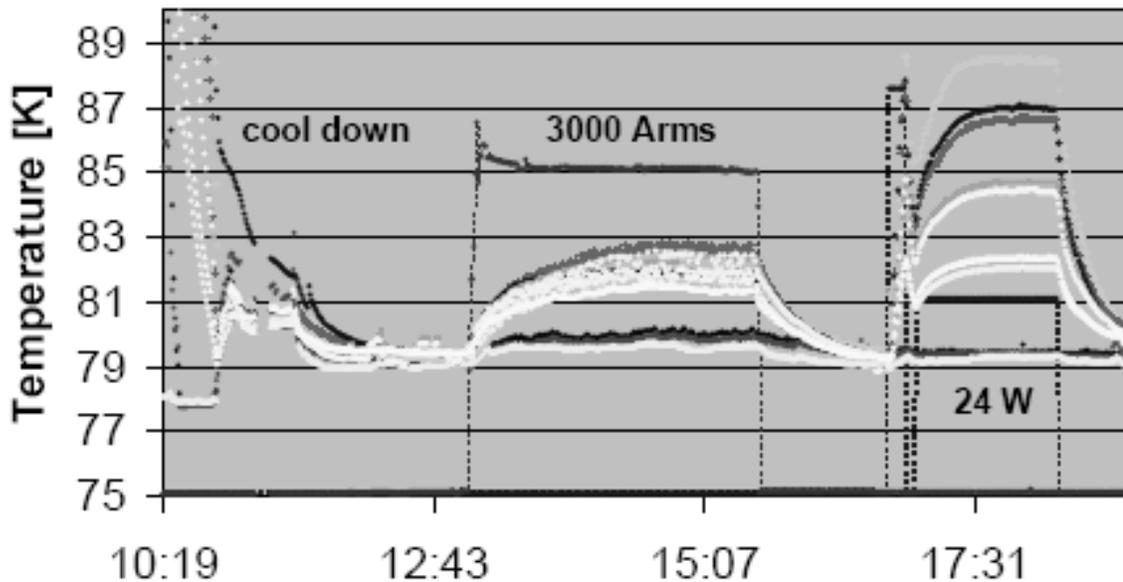
Figura 50. Arreglo de las pruebas de ULTERA, con una cámara de presión refrigerada, en la Universidad Técnica de Dinamarca. El equipo de prueba es operado por el científico de investigación de ULTERA, Chresten Traholt



4.2.4.3 Resultados

El cable se cargó a $3 \times 3.0\text{-}3.2$ kA por más de dos horas y las temperaturas dentro del cable fueron monitorizadas por sensores de temperatura. Como se ve en la figura 52, el aumento de temperatura en el centro del cable a 60 Hz era de 2-3 Kelvin con respecto al refrigerante circundante. El aumento de temperatura fue algo bajo a 50 Hz. Esto significa que el modelo de los cables Triax era capaz de transportar los 3×3.0 kA durante el tiempo especificado por el proyecto demostrativo de AEP.

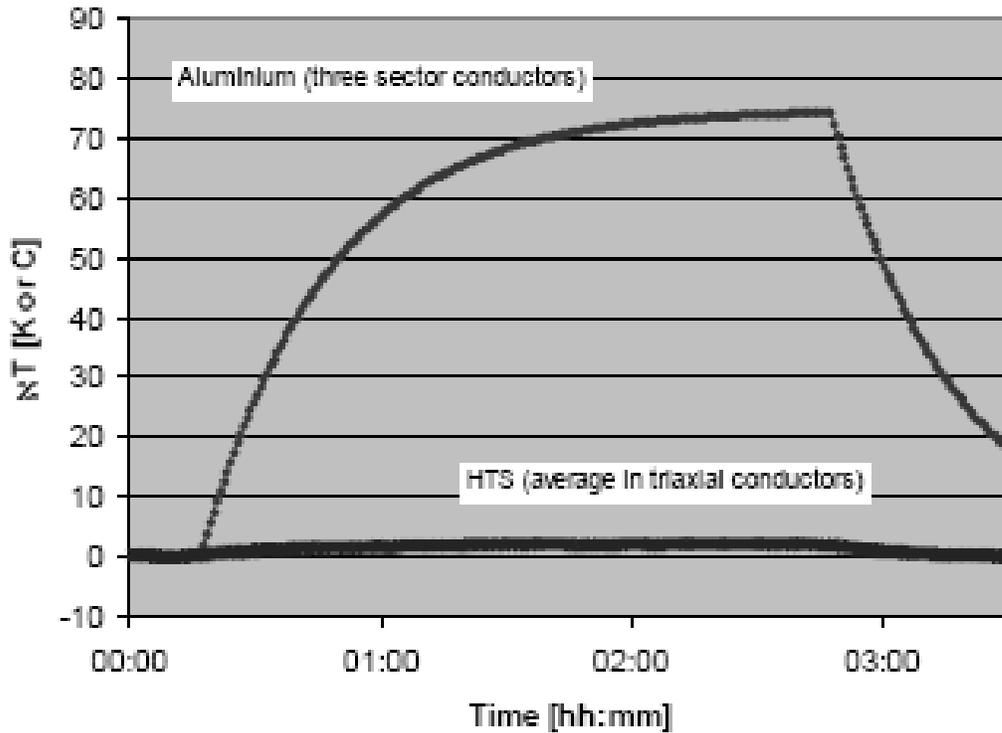
Figura 51. Perfil actual y respuesta de temperatura en un modelo de cable Triax 3 x 3.0 kA, de tres metros de largo



4.2.4.4 Las variaciones rápidas de carga

El aumento de temperatura de 2-3 Kelvin (o Celsius) a corriente máxima de operación debe compararse al aumento de 70-80 Kelvin en un cable de cobre o aluminio a plena carga, figura 53. El funcionamiento estable de la temperatura significa que el supercable Triaxial pueden sostener las rápidas y repetidas variaciones en la carga, sin degradarse, desde efectos mínimos de la reducción térmica y su expansión.

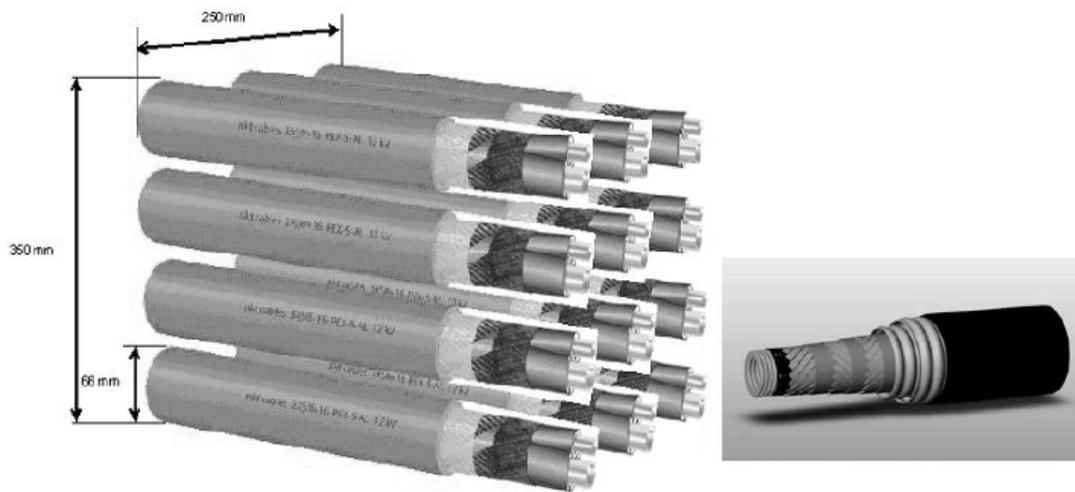
Figura 52. Comparación del incremento de la temperatura a la plena carga para un cable de aluminio de 12 kV (calculado) y el supercable Triax (medido)



4.2.4.4.1 Transmisión de potencia y voltaje de distribución

La capacidad para llevar 3.0 kA en un cable compacto de 15 kV, significa que el nivel de transmisión de potencia de 52-78 MVA puede transportarse a los niveles de voltajes de distribución. Las muy bajas impedancias (resistencia e inductancia) significan que la energía puede ser transportada por arriba de las distancias de 200 km a este bajo voltaje. El mismo hecho requeriría una serie de 12 cables paralelos de 12 kV, 3 x 240mm² de aluminio. El tamaño de tal arreglo es mucho más grande, comparado al tamaño del cable Triax experimental visto en la figura 54. El peso es del orden de 53 kg/m comparado al de 12 kg/m para el Triax.

Figura 53. Una serie de 12 x 240 mm², conductores de tres fases de 12 kV tres-fase comparados al Triax experimental



4.2.4.5 Parámetros técnicos y aplicaciones

Las propiedades eléctricas, físicas y térmicas de un sistema Triax de 12 kV, 3 kA y un arreglo comparado de un sistema convencional se resume en la tabla V.

Tabla VI. Comparación de propiedades entre un cable Triax de 3 kA, 12 kV y una serie de cables de 12 x 3 x 240mm² de Aluminio

Property	3 kA Triax 12 kV	12 x 240 mm ² Alu, 12 kV	Units
<u>Electrical properties</u>			
Rated voltage	10-15	12	kV _{ph-ph}
Rated current	3000	12x400 (in air)	A _{rms}
De-rating factor	1.0	0.60	-
Operating current	3000	2880	A _{rms}
Time constant	20	30	min
Rated power (12 kV)	62	60	MVA
DC resistance	0.00	10.4	μΩ/m
AC resistance	0.17	17.4	μΩ/m
Inductance	16	19.9	nH/m
Capacitance	5102	6360	pF/m
<u>Physical properties</u>			
Size	Ø143	350 x 250	mm
Weight	12	53	kg/m
Pulling force	2	12 x 1.5	tons
<u>Thermal properties</u>			
Heat released at 3 kA	-2	+156	W/m
Temperature increase	+2	+75	K

Las propiedades eléctricas de un supercable Triax pueden usarse para extender el alcance de una red a 10-15 kV, por ejemplo para mover transformadores de 30-150 kV fuera del centro de las ciudades o fuera de localidades críticas. Una segunda potencial aplicación es remover un nivel de voltaje, por ejemplo los niveles de 30 kV o 50-69 kV.

Para aplicaciones industriales, esto puede llevar a un diseño simplificado y mejorado de las fábricas con los transformadores de HV trasladados unos kilómetros fuera del área de la fábrica.

5. VIABILIDAD DE LA INVERSIÓN EN PROYECTOS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA SUPERCONDUCTORA

5.1 Aplicaciones y sus desventajas

Las actuales investigaciones realizadas en el campo de la superconductividad, siguen dando frutos en el ámbito teórico. Siendo así, los físicos *Alexei A. Abrikosov*, *Vitaly L. Ginzburg* y *Anthony J. Leggett* ganaron el premio Nobel de Física 2003 concedido por la Real Academia Sueca, por su trabajo en el área de la física cuántica en relación a la superconductividad y superfluidez. Los tres galardonados concluyeron que el cobre, siendo un material eficiente en la extracción del calor desde el ambiente, servirá como recubrimiento de los cables superconductores como ayuda al sistema refrigerante. Y esta noticia alienta el desarrollo de la industria del cobre.

Mientras que los científicos escudriñan la superconductividad, es indiscutible que la potencialidad de la misma es sorprendente, pues, nuestra vida cotidiana se ve circunscrita a la utilización de dispositivos eléctricos y nuestras sociedades se han hecho dependientes de las diversas comodidades y necesidades que devienen del uso de la electricidad, por lo que poseer el control del estado superconductor de los materiales, reduciendo hasta un 20% el consumo de la energía eléctrica, y que el acceso de esta tecnología se ampliara a todos los sectores de nuestras sociedades, se traduciría en una baja del consumo energético global, aunado a una reducción de las emisiones de gas de efecto invernadero y por tanto al rescate de nuestro ecosistema.

Según datos de International Superconductivity Industry Summit (ISIS), que agrupa a las principales organizaciones industriales y académicas europeas, norteamericanas y japonesas que trabajan en esta área, el mercado mundial en superconductores crecerá hasta 4 billones de pesetas en el año 2010 y casi a los 20 billones en el 2020¹⁶, por lo que se vislumbra un futuro tecnológico interesante en el campo energético.

Las investigaciones realizadas han demostrado que los efectos magnéticos de los materiales superconductores posibilitan múltiples aplicaciones. Los scanner de resonancia magnética utilizados para tomar imágenes del cuerpo es un ejemplo significativo, y el futuro pareciera prometedor en el campo de la medicina, si se lograran aplicaciones en equipos de diagnóstico, por su eficiencia. El desarrollo de los trenes Maglev, (con prototipos ya en Europa, China y Japón), pueden desplazarse levitando sin pérdida de energía por fricción y desarrollar velocidades de 500 kilómetros por hora. Y otras aplicaciones en el campo del transporte y almacenamiento de la energía eléctrica, en los aceleradores de partículas con que experimentan los físicos, en tecnologías de la información y comunicación, y hasta en procedimientos de «filtración magnética» que podrían purificar el agua o el aire con una eficacia cien veces superior a la de los medios actuales.

¹⁶ La investigación en la superconductividad, <http://www.csis.es>, enero de 2006.

Tabla VII. Perspectivas económicas de las aplicaciones de la superconductividad a escala mundial (en millones de €)¹⁷

Años	1997	2000	2003	2010
Aparatos científicos destinados a la investigación	355	415	550	840
Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM)	1400	1900	2100	2750
Subtotal	1755	2315	2650	3590
Nuevas aplicaciones electrónicas	35	25	55	980
Nuevas aplicaciones electrónicas	20	30	75	680
Subtotal	55	55	130	1660
Estimación del mercado mundial global	1810	2370	2780	5250
Parte correspondiente a los LTS	1805	2355	2730	3650
Parte correspondiente a los HTS	5	15	50	1600

Existen también interesantes perspectivas de aplicaciones en el campo de los circuitos integrados, donde la velocidad de ejecución está limitada no por los diferentes elementos del circuito, sino más bien por las conexiones resistivas. El empleo de materiales superconductores permitirá paliar este inconveniente y construir microprocesadores más rápidos, con la condición que el circuito pueda funcionar a la temperatura de superconducción.

La principal dificultad en el campo de la transmisión de energía eléctrica con extensión a las demás aplicaciones, aunado al costo económico es producir cables flexibles con materiales frágiles, sin alterar sus propiedades superconductoras.

¹⁷ Fuente: CONECTUS (Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity), diciembre de 2001.

Sin embargo, las dificultades con las características de los actuales materiales superconductores, pueden minimizarse desarrollando nuevas técnicas de fabricación de los cables (en el caso de las líneas de transmisión), y no especificar en el conocimiento profundo del comportamiento de sus estructuras cristalinas.

Por ahora estos cables tienen un costo económico mayor a los cables convencionales de cobre y aluminio. Las cintas superconductoras que se han construido, necesitan de un 70% de plata, ya que ésta es necesaria para mantener unidos los diferentes elementos del material del cable.

Y esto resulta en un precio de dos a tres veces superior con relación a un cable de cobre de la misma capacidad; sin embargo, el costo invertido puede llegar a ser menor con respecto a la utilidad que ofrece.

La actual tecnología en cables superconductores demuestra que, cuando la demanda de energía es demasiada (en el caso de una subestación eléctrica), y no baste con la capacidad instalada, es más económico instalar cables superconductores que agregar más cables de cobre. Esto, por el hecho que se obtiene una mayor capacidad para absorber la demanda de energía y es más fácil la instalación. Claro que la decisión debe estar refrendada con el análisis financiero del proyecto y con el estudio de costo-utilidad.

Una de las deficiencias actuales con los cables superconductores, además de la tecnología del refrigerante, es que no logran eliminar totalmente las pérdidas en corrientes alternas que están alrededor del 1%, debido a que el campo magnético creado por la corriente penetra en regiones específicas del superconductor, creando islas o "vórtices" de conductividad anormal. Las variaciones resultantes de los ciclos de la corriente alterna, hacen que se pierda energía en el superconductor mientras esto ocurre. Se espera que con la llegada de los superconductores de "alta temperatura" se vuelvan más viables muchas de las aplicaciones posibles, demostrando así el potencial desarrollo tecnológico que se avecina.

5.1.1 Propiedades que se requieren en los superconductores comerciales

1. **La mayor temperatura crítica posible.** Esto se debe a que, cuanto mayor sea, más elevada podrá ser la temperatura de operación del dispositivo fabricado; y de esta manera se reducen los costos por refrigeración requeridos para alcanzar el estado superconductor en operación.
2. **El mayor campo magnético crítico posible.** Como se pretende utilizar el superconductor para generar campos magnéticos intensos, mientras mayor sea el campo magnético que se quiere generar, mayor tendría que ser el campo crítico del material superconductor.
3. **La mayor densidad de corriente crítica posible.** A mayor densidad de corriente crítica que la muestra pueda soportar antes de pasar al estado normal, más pequeño podrá hacerse el dispositivo.

4. **La mayor estabilidad posible.** Es muy común que los superconductores sean inestables bajo cambios repentinos de corriente, de campos magnéticos, o de temperatura, o bien ante choques mecánicos e incluso por degradación del material al transcurrir el tiempo. Así que, si ocurre algún cambio súbito cuando el superconductor está en operación, éste podría perder su estado superconductor. Por eso es conveniente disponer de la mayor estabilidad posible.

5. **Facilidad de fabricación.** Un material superconductor será completamente inútil para aplicaciones en gran escala si no puede fabricarse fácilmente en grandes cantidades.

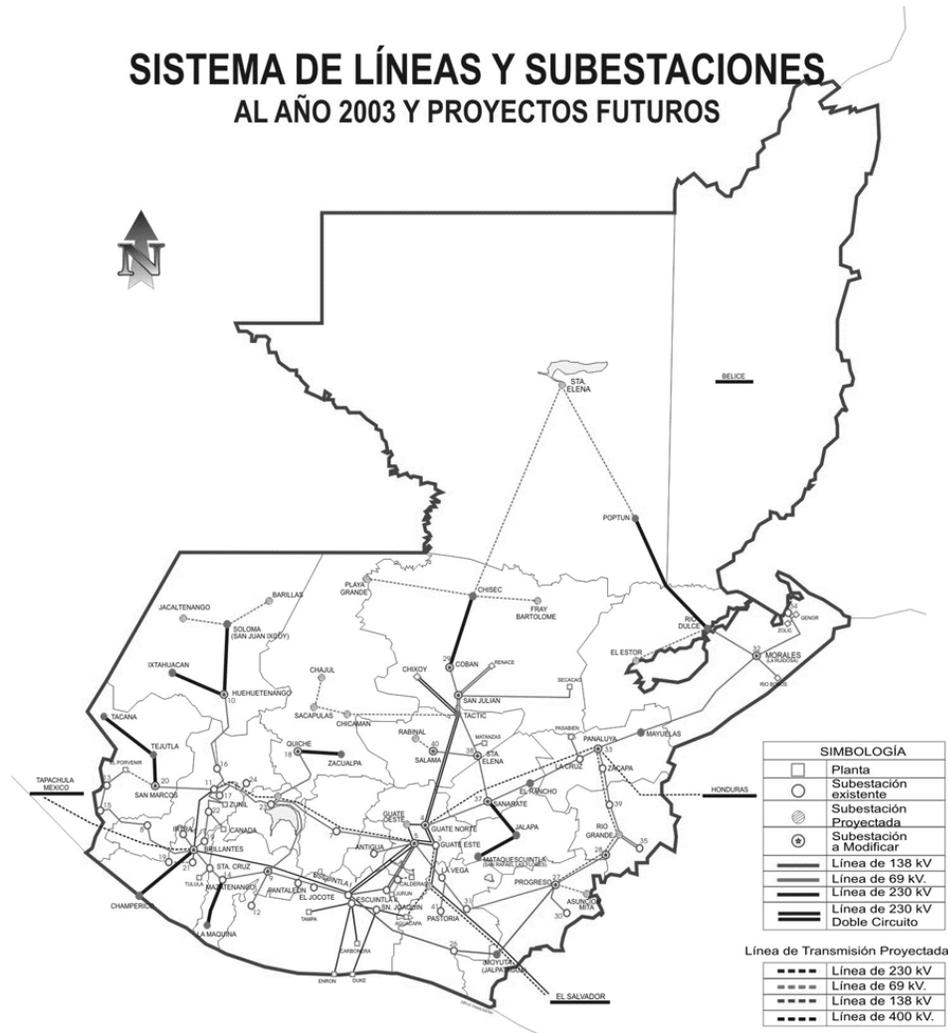
6. **Costo mínimo.** Como siempre, el costo es el factor más importante para considerar cualquier material utilizado en ingeniería y deberá mantenerse tan bajo como sea posible.

5.2 Viabilidad de la inversión

El Instituto Nacional de Electrificación (INDE), creado el 27 de mayo de 1959 por medio del decreto 1287¹⁸; actualmente integrado por la Empresa de Generación de Energía Eléctrica (EGEE); Empresa de Transporte y Control de la Energía Eléctrica (ETCEE); y la Empresa de Comercialización de Energía, es el ente que regula un gran porcentaje del sector energético del país en el área de transmisión, véase figura 54.

¹⁸ Historia, www.inde.gob.gt, abril de 2005.

Figura 54. Sistemas de Líneas y Subestaciones en Guatemala



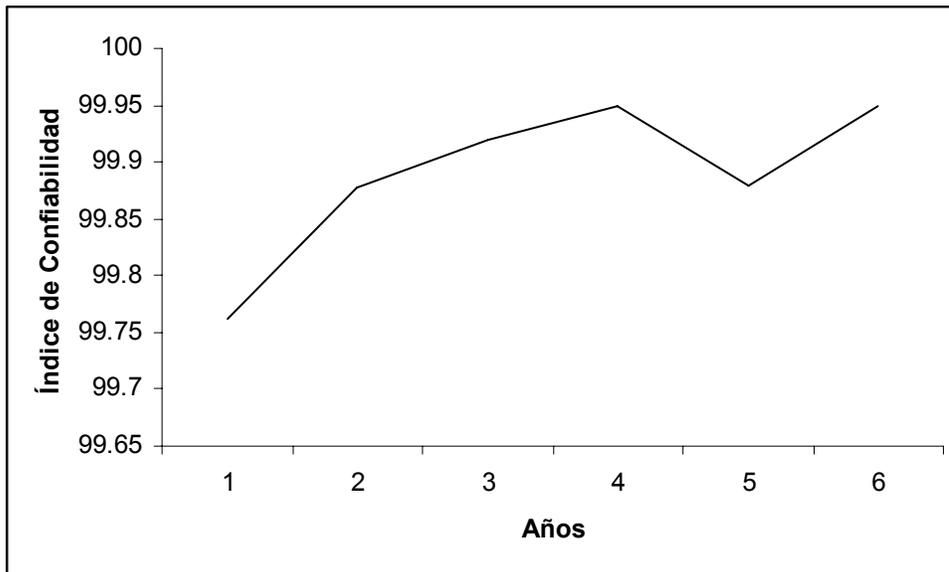
El INDE junto con las empresas privadas, definen la prestación y calidad del servicio eléctrico a la población guatemalteca.

Según datos obtenidos de la página de Internet del INDE, el índice de confiabilidad de la red de transporte de energía en líneas de transmisión hasta 2004 fue de %99.95 (véase tabla VIII y figura 56).

Tabla VIII. Índices de confiabilidad de la red de transporte

ÍNDICE DE CONFIABILIDAD DE LA ETCEE			
ÍNDICE DE CONFIABILIDAD %			
AÑO	LÍNEAS	TRAFOS	GLOBAL
1999	99.7618	99.938	99.846
2000	99.8778	99.940	99.903
2001	99.9206	99.975	99.945
2002	99.9489	99.992	99.967
2003	99.8801	99.941	99.906
2004	99.95	99.97	99.96

Figura 55. Gráfica Año Vrs. Porcentaje del Índice de Confiabilidad en Líneas de Transmisión



En el caso de las líneas de transmisión, no pareciera necesaria una modernización inmediata, puesto que el índice de confiabilidad, hasta 2004, refleja un ascenso considerable. Y esto da muestras de la eficiencia del INDE en el mantenimiento y reparación de las líneas de transmisión.

A continuación se analizará la capacidad del INDE de absorber la posible inversión en tecnología superconductora en el sector energético del país. Además será comparada la capacidad económica del gobierno de Guatemala respecto del de Dinamarca (tomando en cuenta las diferencias en cuanto a nivel de desarrollo); mismo que, como se presentó en páginas anteriores, ya realizó un plan piloto en la implementación de esta tecnología superconductora.

5.2.1 Presupuesto asignado y ejecutado del INDE

Según datos de la Dirección Técnica del Presupuesto del Ministerio de Finanzas Públicas, se obtuvo un historial de los ingresos y egresos totales en el período del 2000 al 2004 (véase tabla IX). Sin embargo, en la institución mencionada se recalcó en la necesidad de obtener los datos oficiales directamente del INDE, pues los proporcionados no eran los oficiales. Estos datos aún no siendo oficiales, son estimaciones aceptables del monto presupuestario del INDE, y para efecto del análisis del presente trabajo, son suficientes, ya que, como se observa en la tabla VIII, aún después que los indicadores muestran eficiencia técnica por parte del INDE (índice de confiabilidad), existe déficit financiero en el promedio de años del 2000 al 2004. Con un estudio profundo de los beneficios económicos y técnicos de la tecnología superconductora, es posible subsanar los gastos de una empresa y aún más, obtener mayores ganancias, por lo que el INDE tendría que indagar al respecto y realizar investigación en el campo de la superconductividad.

Tabla IX. Ejecución presupuestaria 2000-2004 del INDE
(en miles de quetzales por año)

RUBRO	2000	2001	2002	2003	2004
INGRESOS TOTALES	2,516,164	933,772	1,019,925	1,177,309	1,494,671
INGRESOS CORRIENTES	1,338,444	932,037	1,019,925	1,135,192	1,416,099
INGRESOS DE CAPITAL	1,177,720	1,736		42,117	78,572
DONACIONES		739			
GASTO TOTAL	2,145,499	921,297	1,161,427	1,277,019	1,551,659
GASTOS CORRIENTES	855,111	728,510	913,700	1,083,252	1,383,914
Intereses Deuda Pública	30,857	23,604	18,866	15,661	13,201
GASTOS DE CAPITAL	1,290,388	192,787	247,728	193,767	167,745
FINANCIAMIENTO DEL DÉFICIT	77,408	316,853	267,321	99,710	56,988
CRÉDITO INTERNO NETO	6,069	668		61,741	61,549
Amortización de Préstamos	6,069	668		65,298	66,518
CRÉDITO EXTERNO NETO	111,793	78,954	57,457		
Amortización de Préstamos		101,552	72,978		
AHORRO EJERCICIOS ANTERIORES	40,454	395,736	324,779	161,451	118,538

Por otro lado, dentro del Plan Puebla Panamá (PPP) Guatemala fue designado como el responsable de dar seguimiento a la iniciativa mesoamericana de la Integración Energética a nivel centroamericano. Esto da muestras de la responsabilidad requerida en eficiencia y proyección de las modernizaciones en este campo, que conjuntamente el INDE con el Gobierno de Guatemala deben emprender, pues, proyectos de gran envergadura como éste, requieren tecnologías rentables y eficientes como lo es la tecnología superconductora.

5.2.2 Comparación de indicadores entre Guatemala y Dinamarca¹⁹

5.2.2.1 Población

Guatemala:

14,655,189 (Julio 2005) de habitantes

Dinamarca:

5,432,335 (Julio 2005) de habitantes

5.2.2.2 Posición a nivel mundial, respecto a la población bajo el nivel de pobreza

Guatemala:

Posición 5..... 75%

Dinamarca:

No aparece en la lista

5.2.2.3 Posición a nivel mundial respecto al PIB, paridad del poder adquisitivo

Guatemala:

Posición 69.....\$59.47 miles de millones

Dinamarca:

Posición 43.....\$174.4 miles de millones

¹⁹ Según datos obtenidos de la página <http://www.indexmundi.com> con fuente en CIA World Factbook, hasta el 1 de enero del 2005.

Figura 56. Guatemala – Producto Interno Bruto (PIB) (miles de millones)

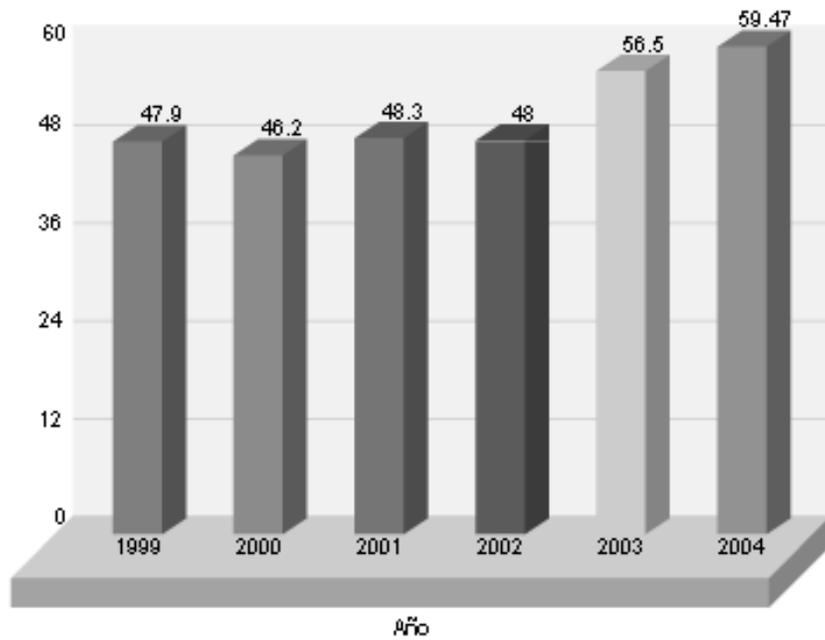
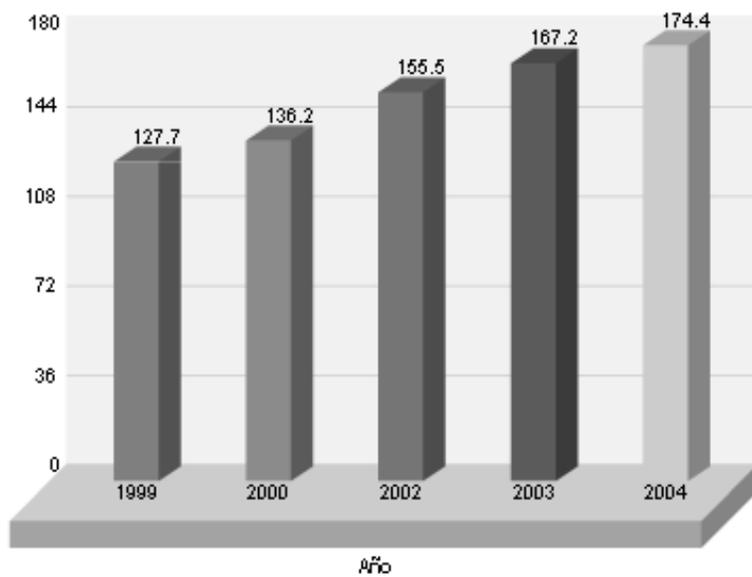


Figura 57. Dinamarca – Producto Interno Bruto (PIB) (miles de millones)



5.2.2.4 Presupuesto

Guatemala:

Ingresos..... \$2,878 miles de millones

Gastos..... \$3,411 miles de millones

Dinamarca:

Ingresos.....\$136,1 miles de millones

Gastos..... \$133,4 miles de millones

5.2.2.5 Monto de la deuda externa

Guatemala:

\$5.969 miles de millones (2004)

Dinamarca:

\$21.7 miles de millones (2000)

5.3 Conclusión

Guatemala ocupa la quinta posición en cuanto a pobreza se refiere a nivel mundial con un 75% de la misma²⁰. Hasta 2004 tenía un PIB de \$59.47 miles de millones que lo colocan en la posición 69 a nivel mundial, y un presupuesto de \$2.878 miles de millones anuales. Con una deuda externa de \$5.969 miles de millones hasta 2004, y un promedio de habitantes hasta 2005 de 14,655,189.

²⁰ En comparación, según el informe de la PNUD del 2003 el total de la población en pobreza hasta el 2002, es de 57.0%. Con fuente del INDH/PNUD.

Dinamarca es un país que no se encuentra dentro de la lista de los países con niveles de pobreza. Un PIB hasta 2004, de \$174.4 miles de millones que lo coloca en la posición 43 a nivel mundial, y un presupuesto anual de \$136.1 miles de millones. Su deuda externa es de \$21.7 miles de millones hasta 2000, y un promedio de habitantes hasta 2005 de 5,432,335.

Es necesario analizar los datos comparados de los dos países, para entender por qué Dinamarca si pudo invertir en tecnología superconductor y porqué Guatemala no lo ha hecho.

La asignación presupuestaria de Guatemala, en relación al presupuesto de Dinamarca es sólo del 2.11%.

La comparación en porcentaje, entre el PIB de Guatemala respecto del PIB de Dinamarca es de solo el 34.1 %. Y esto, con una estimación de habitantes entre Guatemala y Dinamarca de 3 a 1.

La viabilidad de inversión en proyectos de alta tecnología en nuestro país, debe compararse con la rentabilidad requerida por aquellos sectores que tienen la capacidad económica y financiera para realizarla. Tomando en cuenta que las ganancias empresariales, lejos de contribuir al desarrollo de la sociedad guatemalteca, según lo demuestra el actual sistema económico capitalista, contribuye sólo. Y si a la triste historia nacional nos atenemos, no se pueden tener muchas esperanzas en cuanto a que los responsables de hacerlo legislen a favor de proyectos de alta tecnología, y menos que los sectores económicamente poderosos estén dispuestos a invertir.

Guatemala se encuentra en el deshonroso quinto lugar de pobreza a nivel mundial, y resultaría iluso pensar que de la noche a la mañana el sector político decidiera legislar para democratizar la riqueza y que los empresarios estuvieran dispuestos a invertir como ya se dijo en otro apartado, en el desarrollo general del país, lo que, por supuesto, implicaría el desarrollo energético integral.

Sin embargo, hay que señalar para efectos de este trabajo que, para que el Estado guatemalteco pueda invertir en tecnología moderna, en este caso, tecnología superconductor en la transmisión de energía eléctrica, tendría que superar antes los requerimientos básicos de nuestra sociedad, en educación, salud, infraestructura y la reducción de la pobreza a niveles aceptables. Reflejar eficiencia y estabilidad gubernamental en el manejo del presupuesto, y una tendencia a la colectivización social de los beneficios logrados. Sin esto, Guatemala seguirá en el subdesarrollo, y no me refiero sólo a la tecnología de punta, que, por cierto, sólo beneficia a un porcentaje minoritario de la población, contrario a lo que la propaganda mediática afirma.

Si Guatemala quiere iniciar el camino para dejar atrás el subdesarrollo, también debe apostar por la tecnología de los superconductores.

CONCLUSIONES

1. La actual tecnología en cables superconductores demuestra que, cuando la demanda de energía es demasiada (en el caso de una subestación eléctrica), y no baste con la capacidad instalada, es más económico instalar cables superconductores que agregar más cables de cobre. Esto, por el hecho que se obtiene una mayor capacidad para absorber la demanda de energía, y es más fácil la instalación. Claro que la decisión debe estar refrendada con el análisis financiero del proyecto y con el estudio de costo-utilidad.
2. Una de las deficiencias actuales con los cables superconductores, además de la tecnología del refrigerante, es que no logran eliminar totalmente las pérdidas en corrientes alternas que están alrededor del 1%, debido a que las variaciones resultantes de los ciclos de la corriente alterna, hacen que se pierda energía en el superconductor mientras esto ocurre. Dato que debe considerarse en proyecciones futuras de implementación en alta tensión en nuestro país.
3. La inversión en tecnología superconductor en Guatemala, vislumbra un futuro prometedor; sin embargo, la viabilidad financiera de la misma incurre en varios tropiezos, no así su viabilidad técnica.

4. Existe desconocimiento generalizado de la potencialidad de los superconductores: a nivel de subalternos, como de dirigencia.
5. La superconductividad reduce hasta un 20% las pérdidas en la transmisión de energía eléctrica, por lo que los beneficios económicos a mediano plazo son considerables.

RECOMENDACIONES

1. Actualmente, la investigación en esta rama de la ciencia, busca superconductores a temperatura ambiente (pues el refrigerante eleva el costo). Algunos investigadores rusos han publicado por Internet el descubrimiento de un material a altas temperaturas (noticia que aún debe corroborarse), y esto genera muchas expectativas para el sector energético mundial. El INDE, conjuntamente con el gobierno de Guatemala, deben trabajar para actualizar al recurso humano en los últimos avances tecnológicos, y con ello generar investigación en nuestro país.
2. Establecer un vínculo o intercambio de información tecnológica con países como Dinamarca, con el objetivo de absorber su experiencia en el campo de la superconductividad y así realizar estudios de implementación en Guatemala
3. Crear un centro de investigaciones tecnológicas, contribuyendo a la expansión integral de Guatemala en el mercado mundial, viabilizando y modernizando los sectores productivos del país.
4. El Gobierno de Guatemala conjuntamente con el sector privado del país, deben realizar una alianza estratégica para paliar las deficiencias en infraestructura eléctrica, y así contribuir al desarrollo guatemalteco.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chen, Mo-Shing. **Electrical Engineering Handbook**. (Capítulo 61) Estados Unidos de América: Universidad de Texas, Arlington, editor en jefe Richard C. Dorf, CRC, 2000. 2,800 pp.
2. **EL PLAN PUEBLA-PANAMÁ, ¿Alternativa o amenaza al desarrollo rural?** AVANCSO y SERJUS, Editores Siglo Veintiuno, 2003. 120 pp.
3. Fernández, Juan C. **Electromagnetismo**. (Capítulo 6) Argentina: Universidad de Buenos Aires, 2004. 32 pp.
4. Grainger, John J. y William Stevenson. **Análisis de Sistemas de Potencia**. McGraw Hill, 1998. 731 pp.
5. **Guatemala: Una agenda para el desarrollo humano. Informe de desarrollo humano, 2003 / Sistema de Naciones Unidas en Guatemala**. Editorial Sur S. A. 2003. 390 pp.
6. Klein, Jean y Sven Ortolí. **Historia y Leyendas de la Superconductividad**. España: Gedisa, 1989, 224 pp.
7. Magañas Solís, Luís Fernando. **Los superconductores**. Segunda Edición. México: Fondo de Cultura Económica, México, 1997. 123 pp.

Referencia Electrónica

<http://www.futurepundit.com>, 28-11-2005
<http://www.modestomontoya.org>, 1-12-2005
<http://www.superconductors.org>, 2-12-2005
<http://www.supercables.com>, 2-12-2005
<http://www.pagina12.com.ar>|República Argentina, 2-12-2005
<http://www.creces.cl/new>, 14-1-2006
<http://www.generalcable.es>, 14-1-2006
<http://www.aragoninvestiga.org>, 15-1-2006
<http://www.rincondelvago.com>, 30-1-2006
<http://www.ar.prysmian.com>, 2-2-2006
<http://www.ieee.org>, 2-2-2006
<http://www.powerencounter.blogspot.com/>, 3-2-2006
<http://www.chemsoc.org/exemplarchem/entries/igrant/>, 3-2-2006
<http://www.coes.org.pe>, 7-2-2006
<http://www.monografias.com>, 7-2-2006
<http://www.epfl.ch>, 8-2-2006
<http://www.fao.org/docrep/007/j3029s/j3029s00.htm>, 11-2-2006
<http://www.din.upm.es/teaching/lab-fis2-web/superc/>, 15-2-2006
<http://www.csic.es>, 17-2-2006
<http://www.arrakis.es>, 18-2-2006
<http://www.wtec.org/loyola/scpa>, 21-2-2006
<http://www.azom.com>, 21-2-2006
<http://www.geocities.com/tresmileniosdeliman>, 21-2-2006
<http://www.aragoninvestiga.org/investigacion>, 22-2-2006
http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog, 25-2-2006
<http://www.minmineria.cl>, 5-3-2006
<http://www.amm.org.gt>, 5-3-2006
<http://www.cnee.org.gt>, 5-3-2006
<http://www.mem.gob.gt>, 5-3-2006
<http://www.eprsiepac.com>, 5-3-2006
<http://neofronteras.org>, 13-3-2006
<http://europa.eu.int/comm/research>, 14-3-2006
<http://www.cedex.es>, 14-3-2006
<http://www.amsuper.com>, 14-3-2006
<http://superconductor.8k.com>, 14-3-2006
<http://www.southwire.com>, 18-3-2006
<http://www.nodo50.org>, 19-3-2006
<http://www.rebellion.org>, 23-3-2006
<http://www.indexmundi.com>, 23-3-2006
<http://www.ultera.net/documents/>, 25-3-2006
<http://lavisit.upf.edu>, 28-3-2006

<http://www.fisicanet.com.ar>, 28-3-2006
<http://www.nkt-cables.com>, 1-4-2006
<http://www.eurekaalert.org>, 11-4-2006
<http://www.gr.ssr.upm.es>, 15-4-2006
<http://www.jetro.go.jp>, 26-4-2006
<http://www.minfin.gob.gt>, 4-5-2006

ANEXO

1. EL EXPERIMENTO DE CABRERA

(Extracto del libro **Los superconductores** del Dr. Luis Fernando Magañas Solís)

TÓMESE un anillo superconductor, colóquese en una región donde el campo magnético sea mucho muy débil y obsérvese la corriente eléctrica en el anillo, muy pacientemente, durante varios meses. Este fue el experimento que Blas Cabrera, quien trabaja en la Universidad de Stanford, realizó con todo acopio de paciencia durante más de doscientos días hasta que, por fin, encontró la huella de lo que podría ser el primer monopolo magnético observado por el hombre.

Como veremos, el experimento de Cabrera puede detectar una carga magnética en movimiento. Su detector es insensible a la velocidad del monopolo, a su masa y a su carga eléctrica, e incluso a su dipolo magnético. El paso de una carga magnética a través del anillo superconductor produciría un brinco en la corriente que circula por el anillo. Esto fue precisamente lo que Cabrera observó: un escalón en la gráfica de la siguiente figura; esta gráfica bien podría hacerse famosa si el resultado de Cabrera se confirma.

La gráfica muestra el cambio en el flujo magnético en el anillo superconductor. Éste es el evento que podría señalar el descubrimiento del monopolo magnético.



Desde luego, un solo suceso o evento experimental no es suficiente y la respuesta del detector podría ser espuria. Por ello, el experimentador debe ser muy cuidadoso y analizar todas las fuentes de error que se le ocurran. El cambio en la corriente observado por Cabrera podría ser causado por fluctuaciones pequeñas en el voltaje de la línea; estas variaciones fueron causadas a propósito y no hubo disparo en el detector. La interferencia electromagnética, inducida por motores y otros aparatos, también fue desechada, pues a propósito se hizo operar a varios cerca del detector y no hubo respuesta alguna. Un rayo cósmico habría podido golpear al anillo superconductor, elevar su temperatura y anular las propiedades superconductoras, pero Blas Cabrera también desecha esta fuente de error, porque el cambio en la temperatura no es suficiente. Podría también haber causas mecánicas, como las producidas por un temblor o por un golpe al aparato. No se registró ningún disturbio sísmico el 14 de febrero de 1982 y, por otro lado, el investigador intentó producir una respuesta de su aparato golpeando el detector con el mango de un desarmador, por ejemplo. En fin, parecería ser que ese único evento, registrado el día de San Valentín, sólo pudo ser causado por el paso del elusivo monopolio magnético.

2. ¿CÓMO FABRICAR UN SUPERCONDUCTOR?

(Documento obtenido de <http://superconductor.8k.com/fabricacion.htm>)

Procesamiento “en seco” de polvo cerámicos

En general, cuando se trata de hacer pastillas cerámicas de un material compuesto por varios elementos químicos, en nuestro caso, $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ -y (color negro oscuro) se parte de compuestos precursores más sencillos, por ejemplo, óxidos simples, Y_2O_3 (color blanco), BaO (color gris) y CuO (color marrón oscuro). La primera etapa del proceso consiste en hacer reaccionar los distintos óxidos mediante tratamientos térmicos a altas temperaturas (entre 900 y 1000 °C) con moliendas intermedias hasta lograr el material monofásico deseado de color negro oscuro. Luego, se debe conformar la pastilla con la forma que se desee. Para ello se debe utilizar presión que compacte el polvo. Normalmente se utiliza una matriz y una prensa.

Por último se debe sinterizar la pastilla para que adquiera resistencia mecánica.

Procedimiento experimental

Materiales necesarios:

- Materias primas:
 - Óxido de Itrio - Y_2O_3 (*color blanco*)
 - Carbonato de Bario - $BaCO_3$ (*color gris*)
 - Óxido Cúprico - CuO (*color marrón oscuro*)
- Balanza (error relativo < 1%)

- Cazoleta de alúmina
- Horno con control de temperatura y si es posible con control de atmósfera. Temperatura máxima > 1000 °C.
- Mortero de ágata y pilón
- Matriz. Diámetro recomendado: 1 pulgada = 2,54cm
- Prensa.

Se necesitará una presión de 1,000 atmósferas sobre el polvo para formar la pastilla.

La prensa generalmente tiene un manómetro graduado. El manómetro puede indicar, la fuerza que imprime la prensa o bien la presión de aceite que se ejerce sobre el pistón interno de la prensa.

Estequiometría:

A continuación se describe brevemente algunas posibilidades para fabricar una pastilla. Luego de considerar varias alternativas posibles se eligió la forma que consideramos más sencilla.

Alternativa 1: Mezcla de elementos químicos por separado.

El compuesto cerámico superconductor que se quiere formar es $Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}$. Si se pudiera mezclar los elementos metálicos (cationes) con el oxígeno (anión) por separado deberíamos tomar: 1 mol de Itrio, 2 moles de Bario, 3 moles de cobre y 6.5 moles de oxígeno para formar un mol del compuesto.

En la tabla siguiente se explica como sería:

Elemento	Masa Atómica	Cantidad	Masa total
Y	88.905 g/mol	1 mol	88.905 g
Ba	137.34 g/mol	2 mol	274.68 g
Cu	63.54 g/mol	3 mol	190.62 g
O	15.9994 g/mol	6.5 mol	103.9961 g
		Masa total mezcla de óxidos =	658.2011 g

Para manipular metales puros es necesario mantenerlos en una atmósfera inerte. En una atmósfera normal, éstos se oxidarían rápidamente. Es por eso que se parte de precursores más estables en condiciones ambientales normales. Los precursores que normalmente se comercializan son óxidos y carbonatos.

Alternativa 2: Mezcla de óxidos



Óxidos	Masa molecular	Cantidad	Masa total
Y ₂ O ₃	225.8082 g/mol	½ mol	112.9041 g
BaO	153.3394 g/mol	2 mol	306.6788 g
CuO	79.5394 g/mol	3 mol	238.6182 g
		Masa total mezcla de óxidos =	658.2011 g

Fracción de óxido de Itrio con respecto a la mezcla de óxidos

$$F(Y_2O_3) = \text{masa}(\frac{1}{2}Y_2O_3) / \text{masa}(Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}) = 0.1715343 = 17.15344\%$$

Fracción de óxido de Bario con respecto a la mezcla de óxidos

$$F(BaO) = \text{masa}(2BaO) / \text{masa}(Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}) = 0.4659348 = 46.59348\%$$

Fracción de óxido de Cobre con respecto a la mezcla de óxidos

$$F(CuO) = \text{masa}(3CuO) / \text{masa}(Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}) = 0.3625308 = 36.25308\%$$

Por ejemplo: para formar 1 gramo de mezcla de óxidos se necesitarán:

0.1715344 g de Y_2O_3

0.4659348 g de BaO

0.3625308 g de CuO

El compuesto BaO no existe como precursor comercial. En su lugar se usa Carbonato de Bario ($BaCO_3$)

Alternativa 3: Mezcla de óxidos y carbonato

Por cada mol de $BaCO_3$ se obtiene un mol de BaO y se libera 1 mol de CO_2 en el proceso de calentamiento. La masa molecular del óxido de Bario (BaO) es: 153.3394 g/mol. La masa molecular del Carbonato de Bario ($BaCO_3$) es: 197.34935 g/mol. Es decir que el $BaCO_3$ tiene 1.2870101 veces más masa que el BaO.

Siguiendo con el ejemplo anterior, para formar un gramo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}$ se necesitarán:

0.1715344 g de Y_2O_3

0.5996627 g de $BaCO_3$ (0.4659348 g x 1.2870101)

0.3625308 g de CuO.

Mezcla de óxidos y carbonatos: 1.1337279 g

En la práctica, es conveniente usar una cantidad mayor de material para formar una pastilla que sea manejable. Usaremos 10 gramos de mezcla de óxidos.

A continuación se describe el procedimiento para fabricar una pastilla de 10g usando la alternativa 3.

Receta para fabricar el material:

Nota importante: No utilice agua como disolvente. Se puede usar acetona o alcohol isopropílico. Evite la humedad en los elementos que entren en contacto con el material.

1) Se deberán pesar las siguientes cantidades:

1.715344 g de Y_2O_3

5.996627 g de $BaCO_3$

3.625308 g de CuO

Mezcla de óxidos y carbonatos: 11.337279 g

2) El siguiente paso es mezclar los tres componentes en un mortero de ágata hasta que la mezcla tome un color homogéneo.

3) A continuación se debe colocar el polvo en una cazoleta de alúmina. Luego calentarlo en el horno a $950^{\circ}C$ durante 12 horas en una atmósfera de oxígeno.

4) Los últimos dos pasos anteriores se deberán realizar dos veces más. Es decir se debe volver a moler y a calentar para homogeneizar la mezcla. En el proceso de molienda, puede notarse una dispersión homogénea de partículas blancas en la mezcla. Estas partículas deben desaparecer. En cada corrida el material se debe volver más oscuro en color.

5) Agregado del ligante (opcional). Se puede mezclar el material con un ligante para facilitar el proceso de prensado. Se puede utilizar Polyvinyl Butyral (PVB). Este ligante puede estar diluido en alcohol isopropílico al 10% en peso. La cantidad adecuada del ligante sólido es 2% en peso con respecto al peso de la mezcla de óxidos. En nuestro caso tenemos 10 gramos de mezcla de óxidos. Por lo que se debe agregar 0.2 gramos de PVB sólido que equivale a 2 gramos de solución.

6) Prensado. Se debe introducir el polvo en la matriz. Utilizar una presión de 1,000 atmósferas o 1000 Kg/cm^2 . Si se utiliza una matriz de 1 pulgada = 2,54 cm de diámetro, luego de prensar quedará una pastilla con una altura aproximada de 6 mm.

7) Calentamiento de la pastilla (sinterizado) en oxígeno. Se debe programar al horno para que realice el siguiente ciclo. Se debe realizar en atmósfera de oxígeno.

Referencias:

1. Patente por Daniel Esparza y Claudio D'Ovidio en:
<http://www.cnea.gov.ar/tecno/patentes/hoja2.htm>.
2. Michel Cyrot Davor Pavuna. Introduction to superconductivity and High Tc Materials Singapore, World Scientific Publi