



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Elaboración de Modelo Matemático de un  
Superconductor en un Medio Marítimo como Vínculo de  
Transmisión de Energía”

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos  
de Potencia**

Presentado por:

**LUIS RAFAEL PACHECO GAVILANES**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2022**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la vida.

A mis padres y hermanos por brindarme su apoyo incondicional.

A mi amada esposa por ser mi soporte y fuente de motivación para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a la Escuela Superior Politécnica del Litoral por aceptarme en su programa de maestría.

A los profesores de la maestría por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

A mi tutor de tesis por su ayuda, paciencia, dedicación y confianza otorgada.

A todas las personas que de una u otra manera me apoyaron para que este trabajo se realice con éxito.

# **TRIBUNAL DE EVALUACIÓN**

---

**Fernando Arturo Vaca Urbano**  
**PROFESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Manuel Sebastián Álvarez-Alvarado**  
**TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Jimmy Javier Córdova Villagómez**  
**PROFESOR REVISOR**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; y doy mi consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

.....  
Luis Rafael Pacheco Gavilanes

## RESUMEN

La búsqueda constante de nuevas fuentes de generación de energía renovable ha conseguido colocar a la generación eólica en un campo altamente prometedor haciendo viable los proyectos de generación eólica en alta mar (offshore). Uno de los principales elementos que compone este sistema de generación es el sistema de transmisión submarino. Estos cables submarinos están conformados por un núcleo de cobre, el cual debido a las largas distancias existentes entre las centrales de generación y los centros de carga, generan pérdidas en la transmisión de energía y caídas de voltaje que exceden los límites permitidos; sin embargo con la finalidad de erradicar los efectos negativos antes mencionados se plantea el sobredimensionamiento de los conductores y el aumento de voltaje en las centrales de generación lo que conlleva a un incremento monetario del proyecto.

Los avances científicos en materiales superconductores de alta temperatura, ha conllevado a la experimentación de estos en aplicaciones para la transmisión de energía con miras a su uso eficiente y la reducción de pérdidas.

El presente documento muestra una comparación técnica-económica entre un cable convencional y un cable superconductor empleado como un vínculo de transmisión de energía en un medio submarino. Respecto a la revisión técnica y al modelo que se espera generar, los parámetros y datos eléctricos de ambos cables se analizan y simulan con el software Comsol Multiphysics con los que se pudo modelar la red de dos puertos y sus componentes ABCD. Para el análisis económico

se tomaron datos referenciales de estudios reales sobre implementación de proyectos de inversión.

Del análisis efectuado se obtuvo que la aplicación de un cable superconductor es técnicamente viable debido que no se presentan pérdidas eléctricas, logrando la transmisión de energía en largas distancias a un voltaje de 13.8 kV. Este hallazgo se contrapone a la viabilidad económica la que muestra que la inversión necesaria en la implementación de tecnología superconductora es cinco veces más costosa que la tecnología convencional, lo que en la actualidad por los altos costos de materiales resulta un proyecto menos rentable en comparación a la inversión en un cable convencional.

Palabras claves: Superconductor de alta temperatura, Cable submarino, Comsol Multiphysics, Parámetros ABCD.

## **ABSTRACT**

*The constant search of new sources of renewable energy generation has placed wind power generation in a highly promising field, making offshore wind power generation projects viable. One of the main elements that make up this generation system is the submarine transmission system. These submarine cables are made up of a copper core, which due the long distances between the generation plants and the load centers, generate losses in the transmission of energy and voltage drops that exceed the allowed limits; however, to eradicate the aforementioned negative effects, it is proposed to oversize the conductors and increase the voltage in the generation plants, which leads to a monetary increase of the project.*

*Scientific advances in high-temperature superconducting materials have led to the experimentation of these materials in power transmission applications with a view to their efficient use and the reduction of losses.*

*This paper shows a technical-economic comparison between a conventional cable and a superconductor cable used as a power transmission link in a submarine environment. Regarding the technical review and the model to be generated, the electrical parameters and data of both cables are analyzed and simulated with the Comsol Multiphysics software to model the two-port network and its ABCD components. For the economic analysis, reference data were taken from real studies on the implementation of investment projects.*

*From the analysis carried out, it was found that the application of a superconducting cable is technically feasible because there are no electrical losses,*



*achieving the transmission of energy over long distances at a voltage of 13.8 kV. This finding contrasts with the economic feasibility which shows that the necessary investment in the implementation of superconducting technology is five times more expensive than conventional technology, which at present, due to the high cost of materials, is a less profitable project compared to the investment in a conventional cable.*

*Keywords: High temperature superconductor, submarine cable, Comsol Multiphysics, ABCD parameters.*

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
<i>ABSTRACT</i> .....	VII
<b>ABREVIATURAS</b> .....	XIII
<b>NOMENCLATURA</b> .....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVIII
<b>Capítulo 1</b> .....	1
<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Formulación del problema .....	3
1.3 Justificación .....	4
1.4 Objetivo general .....	4
1.5 Objetivos específicos .....	4
<b>Capítulo 2</b> .....	6
<b>2. Marco Teórico</b> .....	6
2.1 Tipos de Conductores .....	6

2.1.1 Conductores Aéreos .....	6
2.1.2 Conductores Soterrados .....	8
2.1.3 Conductores Submarinos .....	9
2.2 Parámetros Eléctricos de los Cables Submarinos.....	17
2.2.1 Parámetros Serie .....	18
2.2.2 Parámetro Paralelo de los Cables Submarinos .....	21
2.3 Análisis de Redes.....	22
2.3.1 Red de Dos Puertos.....	23
2.3.2 Modelos de Líneas de Transmisión .....	24
2.3.3 Diagrama de Potencia .....	27
2.4 Superconductores .....	29
2.4.1 Propiedades Magnéticas de los Superconductores Tipo I y Tipo II .....	31
2.4.2 Superconductores de Alta y Baja Temperatura .....	34
2.4.3 Estructura de un Cable Superconductor .....	34
2.4.4 Categorías de Cables Superconductores .....	36
2.4.5 Configuración de Cables.....	37
2.4.6 Componentes de un Sistema Eléctrico con Cables Superconductores	38
2.4.7 Parámetros del Cable Superconductor .....	39
2.4.8 Pérdidas en un Cable Superconductor .....	41
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>42</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>42</b>
3.1 Modelo de Elementos Finitos .....	42

3.2	Software Comsol Multiphysics.....	44
3.3	Solución del Método de Elementos finitos en Comsol Multiphysics	47
3.3.1	Cálculo de Impedancia mediante Método de Elemento Finitos .....	48
3.3.2	Cálculo de la Admitancia con el Método de Elementos Finitos.....	51
3.4	Modelación de Cable Submarino y Superconductor .....	53
3.4.1	Consideraciones de Diseño del Cable Submarino .....	54
3.4.2	Simulación Multifísica del Cable Submarino Convencional .....	55
3.4.3	Consideraciones de Diseño del Cable Superconductor .....	62
	<b>Capítulo 4</b> .....	<b>64</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados y Análisis</b> .....	<b>64</b>
4.1	Simulaciones y Resultados del Cable Convencional.....	64
4.1.1	Capacitancia .....	64
4.1.2	Resistencia e Inductancia .....	65
4.2	Simulaciones y Resultados del Cable Superconductor .....	66
4.2.1	Capacitancia .....	67
4.2.2	Resistencia e Inductancia .....	68
4.3	Red de Dos Puertos de los Cables en Estudio.....	68
4.4	Sistema de Prueba .....	70
4.4.1	Sistema IEEE 9 Barras (modificado).....	71
4.5	Análisis Económico .....	75
4.5.1	Supuestos .....	75

4.5.2 Datos del estudio económico .....	76
4.6 Análisis de Resultados .....	78
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>81</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>81</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>84</b>

## ABREVIATURAS

AAAC	All Aluminium Alloy Conductor
AAC	All Aluminium Conductor
ABB	Asea Brown Boveri Ltd
AC	Altern Current
ACAR	Aluminum Conductor Alloy Reinforced
ACCR	Aluminum Conductor Composite Reinforced
ACFR	Aluminium Conductor Fiber Reinforced
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
ACSS	Aluminum Conductor Steel Supported
CD	Cold Dielectric
DC	Direct Current
EPR	Ethylene Propylene Rubber
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GTZACSR	Gap type super thermal-resistant aluminum alloy conductor steel reinforced
HTS	High Temperature Superconductor
HVAC	High Voltage Altern Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTS	Low Temperature Superconductor
MEF	Método de Elementos Finitos
PE	Polyethylene
PPLP	Polypropylene Laminated Paper
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
WD	Warm Dielectric
XLPE	Cross Linked Polyethylene
YBCO	Yttrium Barium Copper Oxide

## NOMENCLATURA

Al	Aluminio
C	Capacitancia
Cu	Cobre
F	Faradio
H	Henrio
°K	Grados Kelvin
Km	Kilometro
kV	KiloVoltio
kVA	Kilovoltiamperio
kW	KiloWatts
L	Inductancia
m	Metro
mH	Milihenrio
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
MVA	Megavoltiamperio
mW	Miliohmio
nF	Nanofaradio
Pb	Plomo
R	Resistencia
uF	Microfaradio
V	Voltio
Ω	Ohmio

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Conductor ACSR típico [11].....	7
<b>Figura 2.2</b> Composición de un conductor soterrado [12].....	8
<b>Figura 2.3</b> Composición de un conductor submarino [14].....	9
<b>Figura 2.4</b> Tipos de configuraciones del conductor [15].....	10
<b>Figura 2.5</b> Clasificación de los cables submarinos .....	13
<b>Figura 2.6</b> Clasificación de cables según el número de conductores [15] .	15
<b>Figura 2.7</b> Punto de equilibrio entre un sistema HVAC vs HVDC [19] .....	16
<b>Figura 2.8</b> Rango de conveniencia del sistema HVAC vs HVDC [19].....	17
<b>Figura 2.9</b> Geometría de un cable tripolar [22].....	19
<b>Figura 2.10</b> Componentes inductivos por fase [22].....	20
<b>Figura 2.11</b> Método de las Imágenes [22].....	22
<b>Figura 2.12</b> Representación de red de dos puertos .....	24
<b>Figura 2.13</b> Representación distribuida de una línea de transmisión [26]..	24
<b>Figura 2.14</b> Modelo de línea corta [26].....	25
<b>Figura 2.15</b> Modelo de línea media a) Modelo Pi. b) Modelo T [26] .....	26
<b>Figura 2.16</b> Línea larga con parámetros distribuidos [26] .....	27
<b>Figura 2.17</b> Modelo Pi de una línea larga [26] .....	27
<b>Figura 2.18</b> Diagrama de flujo de potencia [28] .....	28
<b>Figura 2.19</b> Comparación de la resistencia eléctrica de un no superconductor y superconductor con respecto al cambio en la temperatura [9].....	30



<b>Figura 2.20</b> Comportamiento del campo magnético B en un superconductor [8].....	30
<b>Figura 2.21</b> Diagrama de fase de un superconductor tipo I [31] .....	32
<b>Figura 2.22</b> Diagrama de fase de un superconductor tipo II [31] .....	33
<b>Figura 2.23</b> Estado mixto de un superconductor tipo II (campo magnético en color negro, corriente de pantalla en color rojo, corriente superconductora en verde) [31] .....	33
<b>Figura 2.24</b> Diseño de un HTS monofásico para operación AC [34].....	35
<b>Figura 2.25</b> a) Superconductor WD, b) Superconductor CD [6] .....	36
<b>Figura 2.26</b> Configuración de cables superconductores [35] .....	38
<b>Figura 3.1</b> Ventana de físicas de Comsol Multiphysics .....	44
<b>Figura 3.2</b> Principales físicas en Comsol Multiphysics.....	45
<b>Figura 3.3</b> Ventana de Estudios de Comsol Multiphysics .....	45
<b>Figura 3.4</b> Flujo de trabajo para simulación y obtención de resultados .....	53
<b>Figura 3.5</b> Sección transversal del cable submarino [42].....	54
<b>Figura 3.6</b> Flujo de trabajo para simulación en Comsol Multiphysics.....	55
<b>Figura 3.7</b> Parámetros Geométricos ingresados en Comsol Multiphysics .	57
<b>Figura 3.8</b> Parámetros electromagnéticos ingresados en Comsol Multiphysics .....	59
<b>Figura 3.9</b> Modelo de cable submarino .....	59
<b>Figura 3.10</b> Representación de Dominios en el modelo .....	60
<b>Figura 3.11</b> Definición de propiedades del material .....	61
<b>Figura 3.12</b> Mallado normal del modelo .....	61
<b>Figura 3.16</b> Sección transversal de conductor HTS tripolar [37] .....	62

<b>Figura 3.17</b> Modelo de cable superconductor en programa Comsol Multiphysics .....	63
<b>Figura 4.1</b> Potencial eléctrico en cable submarino.....	64
<b>Figura 4.2</b> Campo eléctrico en cable submarino.....	65
<b>Figura 4.3</b> Densidad de flujo magnético en cable submarino.....	66
<b>Figura 4.4</b> Potencial eléctrico en cable superconductor.....	67
<b>Figura 4.5</b> Campo eléctrico en cable superconductor.....	67
<b>Figura 4.6</b> Densidad de flujo magnético cable superconductor.....	68
<b>Figura 4.7</b> a) Diagrama de flujo de potencia de cable convencional, b) Ampliación al punto de operación.....	70
<b>Figura 4.8</b> a) Diagrama de flujo de potencia de cable superconductor, b) Ampliación al punto de operación.....	70
<b>Figura 4.9</b> Modelo IEEE 9 barras modificado.....	72
<b>Figura 4.10</b> Resultado del flujo de potencia en el sistema.....	72
<b>Figura 4.11</b> Flujo de potencia con cable submarino.....	74
<b>Figura 4.12</b> Flujo de potencia con cable superconductor.....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Comparación entre transmisión AC y DC .....	17
<b>Tabla 2.2</b> Temperatura y Campo críticos de superconductores tipo I .....	32
<b>Tabla 2.3</b> Temperatura y Campo críticos de superconductores tipo II .....	34
<b>Tabla 2.4</b> Capas de un cable superconductor .....	36
<b>Tabla 2.5</b> Comparación entre superconductor WD y CD.....	37
<b>Tabla 2.6</b> Ventajas y desventajas entre las configuraciones de cable superconductor [35].....	38
<b>Tabla 3.1</b> Parámetros Geométricos 1.....	56
<b>Tabla 3.2</b> Parámetros Geométricos 2.....	57
<b>Tabla 3.3</b> Parámetros Electromagnéticos.....	58
<b>Tabla 3.7</b> Parámetros geométricos de cable superconductor .....	62
<b>Tabla 4.1</b> Capacitancia del cable submarino .....	65
<b>Tabla 4.2</b> Resistencia e inductancia del cable submarino .....	66
<b>Tabla 4.3</b> Pérdidas eléctricas en los elementos .....	66
<b>Tabla 4.4</b> Capacitancia de cable superconductor.....	67
<b>Tabla 4.5</b> Resistencia e inductancia del cable superconductor .....	68
<b>Tabla 4.6</b> Pérdidas en cable superconductor .....	68
<b>Tabla 4.7</b> Resumen de resultados obtenidos .....	69
<b>Tabla 4.8</b> Parámetros del cable submarino .....	69
<b>Tabla 4.9</b> Parámetros ABCD del cable submarino .....	69
<b>Tabla 4.10</b> Parámetros del cable superconductor .....	69
<b>Tabla 4.11</b> Parámetros ABCD del cable superconductor .....	69

<b>Tabla 4.12</b> Parámetros de modelo IEEE 9 barras (modificado) .....	71
<b>Tabla 4.13</b> Datos supuestos para análisis económico.....	76
<b>Tabla 4.14</b> Cálculo de periodo de retorno de la inversión .....	77
<b>Tabla 4.15</b> Resumen de resultados análisis económico .....	78

# Capítulo 1

## 1. Introducción

El aumento poblacional e industrial conlleva a un incremento en el consumo de energía eléctrica a nivel mundial lo que se manifiesta en un impacto ambiental conocido como calentamiento global. Esto impulsa a la sociedad actual a buscar nuevas fuentes de energía renovables [1].

Existen muchas fuentes energéticas que se usan para diferentes actividades dentro del territorio ecuatoriano, para esto es interesante identificar si conlleva un impacto directo o indirecto sobre aspectos de carácter económico y social. Es importante detallar las características de las principales fuentes naturales, entre ellas la energía eólica indicando un procedimiento en específico para posterior a ello estudiar su aprovechamiento energético.

El viento es una fuente de energía renovable ambientalmente limpia mientras se encuentre en fase de operación debido a que los aerogeneradores tienen una vida útil de entre 25 a 30 años, luego de ese tiempo los materiales utilizados en su fabricación no son totalmente reciclables [2], es confiable y relativamente económica. Con los avances tecnológicos dados en las turbinas eólicas de velocidad variable, mejoras en la electrónica de potencia han logrado posicionar a la energía eólica como una forma de energía competitiva, dando así la posibilidad de buscar nuevas aplicaciones como son los parques eólicos en alta mar (offshore wind farms) [3], [4]. En este tipo de aplicaciones el sistema de transmisión de energía eléctrica supone una parte importante de la inversión total, por lo que, se debe implantar un diseño óptimo, eligiendo adecuadamente el tipo de corriente, el nivel de tensión y el tipo de cable que se debe instalar en cada tramo, tanto para la conexión entre los

aerogeneradores como la línea de evacuación a tierra, debido a que la transmisión y distribución de energía a través de cables tradicionales genera pérdidas de alrededor del 10% del total de energía generada [5].

El descubrimiento de materiales superconductores de alta temperatura cuya temperatura crítica es de  $77^{\circ}\text{K}$  ha renovado el interés por el uso de cables superconductores para la transmisión y distribución de energía [6]. Dicha tecnología supone una alternativa para transportar energía desde una central offshore a un centro de carga, debido a que un superconductor tiene la posibilidad de transmitir más potencia (aumentando la corriente) sin tener que aumentar la tensión, debido a que los superconductores tienen una impedancia considerablemente menor a los cables convencionales [7].

## **1.1 Antecedentes**

El descubrimiento de la superconductividad se remonta a las investigaciones que se empezaron a hacer acerca de la licuefacción de los gases, la cual inició a mediados de 1845. La licuefacción de los gases es el cambio de estado que ocurre cuando una sustancia pasa del estado gaseoso al líquido, debido al aumento de presión y disminución de la temperatura, obteniendo una sobrepresión elevada [8].

En 1914 Kamerlingh Onnes descubrió el estado superconductor de un material al realizar experimentos a una muestra de mercurio enfriándola por debajo de los  $4.22^{\circ}\text{K}$ , donde observó que la resistividad del metal disminuía de una manera abrupta. Además, encontró que la propiedad superconductora del metal se perdía al incrementar la temperatura (temperatura crítica) o al someter al metal a un campo magnético intenso (campo magnético crítico).

En el año 1933 Walther Meissner y Robert Oschenfeld realizaron experimentos en materiales superconductores, el hallazgo encontrado fue que al aplicar un campo

magnético bajo a un metal es su estado superconductor no se formaban campos magnéticos en su interior; este efecto se lo conoce como efecto Meissner-Oschenfeld [9].

A fines del año 1986 los científicos Johannes Bednorz y Karl Müller, observaron que la temperatura crítica en el compuesto formado por óxido de cobre, bario y lantano ( $\text{BaLa}_4\text{Cu}_5\text{O}_{13.4}$ ) era de  $35^\circ\text{K}$ . Este hallazgo motivó a la investigación y desarrollo de nuevos compuestos superconductores con temperaturas críticas superiores a las del punto de ebullición del nitrógeno líquido ( $77^\circ\text{K}$ ) [8].

En la actualidad se cuenta con materiales superconductores con temperaturas críticas elevadas como son los basados en compuestos cerámicos como el  $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$  cuya temperatura crítica es de  $138^\circ\text{K}$ .

Estos avances en el descubrimiento de nuevos materiales superconductores con altas temperaturas críticas ha conllevado al desarrollo de aplicaciones de superconductores como medios de transporte de energía como son: el proyecto Long Island, USA en 2008 en el que se realizó la interconexión de la red de transmisión a 138 kV por medio de un superconductor de 600 m de longitud. Proyecto Hydra en Manhattan, USA en el año 2013 que fue la primera interconexión entre dos subestaciones por medio de un superconductor a 13.8 kV. Proyecto AmpaCity en Essen, Alemania en el año 2014 en el que se implementó un superconductor de 1000 m de longitud a 10 kV.

## **1.2 Formulación del problema**

La transmisión de energía desde una central eólica en alta mar hasta un centro de carga se la realiza por medio de cables aislados a nivel de medio voltaje. Debido a la distancia existente entre la central y la costa hace necesario el sobredimensionamiento de los cables para disminuir en lo posible la caída de voltaje

implicando un incremento en el costo de inversión en un proyecto de este tipo. En el escenario de que el centro de carga se encuentre a varios kilómetros de la costa, la construcción de una subestación elevadora es requerida para transportar la energía hasta la ubicación de los usuarios finales, incrementando aún más el costo del proyecto.

### **1.3 Justificación**

Los superconductores debido a sus propiedades permiten la transmisión de energía eléctrica con una eficiencia cercana al 100%, además de contar con una alta ampacidad. Con estas premisas la implementación de un sistema de transmisión por medio de superconductores hará posible la transmisión de energía sin caída de voltaje y sin la necesidad de la implementación de subestaciones elevadoras evitando así costes en la inversión del proyecto.

### **1.4 Objetivo general**

Modelar un cable superconductor en un medio submarino aplicando el método de elementos finitos y el uso de programas computacionales para realizar simulaciones de parámetros físicos con el fin de representar el comportamiento del superconductor y poder realizar estudios comparativos entre el conductor propuesto y los conductores de tipo XLPE que se usan en la actualidad.

### **1.5 Objetivos específicos**

- Realizar simulaciones de un cable convencional con aislamiento XLPE y un superconductor en el software Comsol Multiphysics para obtener sus parámetros eléctricos (resistencia, inductancia y capacitancia).



- Comparar el modelo del superconductor (con los resultados obtenidos) con el modelo de cable convencional, mediante un flujo de potencia.
- Evaluar la viabilidad económica sobre el uso de superconductores como vínculos de transmisión de energía en un medio submarino.

# Capítulo 2

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Tipos de Conductores

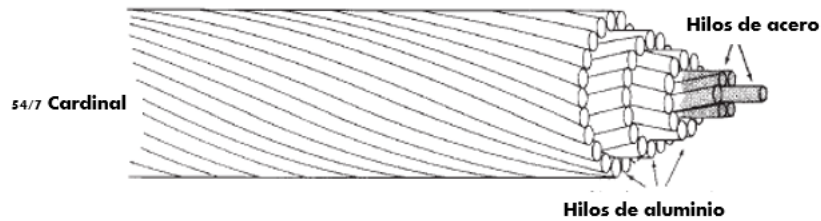
Un cable eléctrico está principalmente por tres elementos: conductor, aislamiento y cubierta. Las características y especificaciones de estas partes dependerán de la aplicación, condiciones de trabajo, cantidad de carga, entre otros aspectos [10].

El conductor es un hilo o alambre de cobre o aluminio que no se encuentra aislado, que debido a un elevado número de electrones libres son idóneos para transportar corriente eléctrica. El cobre presenta varias ventajas frente al aluminio como son: menor resistencia eléctrica, mayor resistencia mecánica, puede ser flexible o rígido. A diferencia del cobre, el aluminio es más económico y presenta menor densidad lo que lo hace más liviano [10]. Los conductores según el medio en el cual estarán inmersos se clasifican en:

- Conductores aéreos.
- Conductores soterrados.
- Conductores submarinos.

#### 2.1.1 Conductores Aéreos

Por lo general son de aluminio, este metal ha reemplazado al cobre como el metal conductor más común para aplicaciones en líneas de transmisión, aunque se requiera un área de sección transversal de aluminio más grande para obtener las mismas pérdidas que en un conductor de cobre, el aluminio tiene un costo menor y es más liviano [11].



**Figura 2.1** Conductor ACSR típico [11]

Uno de los tipos de conductores más comunes es el conductor de aluminio reforzado con acero (ACSR) que está conformado por capas de aluminio que rodean un núcleo central de hebras de acero.

Otros tipos de conductores son:

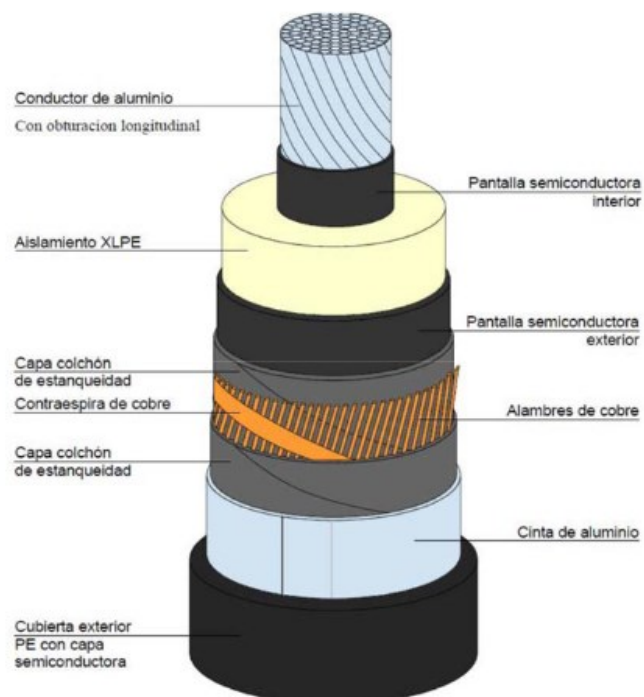
- Conductor completamente de aluminio (AAC).
- Conductor de aleación de aluminio (AAAC).
- Conductor de aluminio reforzado con aleación (ACAR).
- Conductor de acero revestido de aluminio (Alumoweld).
- Conductores de alta temperatura de operación como el conductor de aluminio con soporte de acero (ACSS) que utiliza aluminio recocido alrededor de un núcleo de acero.
- El conductor de aluminio ZT (GTZACSR) que utiliza aluminio resistente al calor sobre un núcleo de acero con un pequeño espacio entre el acero y la primera capa de hilos de aluminio.
- Conductor de aluminio reforzado con carbono (ACFR) cuyo núcleo es un compuesto de una matriz de resina que contiene fibra de carbono.
- Conductor de aluminio compuesto reforzado (ACCR), cuyo núcleo es una matriz de aluminio que contiene fibras de aluminio.

Para aplicaciones de líneas de extra alto voltaje se suele usar más de un conductor por fase. Los conductores agrupados tienen una menor intensidad de campo eléctrico en su superficie, además de tener una reactancia serie más pequeña.

### 2.1.2 Conductores Soterrados

Usados generalmente en zonas urbanas o en lugares que se tenga alguna restricción ambiental como son las zonas protegidas. Están conformados por los siguientes elementos [12] :

- Aislamiento.
- Cubierta de polietileno.
- Cubierta de polietileno reticulado (XLPE).
- Etileno propileno (EPR).
- Cable (cobre o aluminio).



**Figura 2.2** Composición de un conductor soterrado [12]

### 2.1.3 Conductores Submarinos

Este tipo de cables se lo instala bajo el mar, por lo general bajo el lecho marino con el fin de evitar daños que se puedan producir debido principalmente a la pesca de arrastre. Estos cables son ampliamente usados en el ámbito de las comunicaciones y en el transporte de energía [13].

Las principales aplicaciones que se dan a los cables submarinos son:

- Enlace entre redes eléctricas continentales.
- Conexión de redes autónomas.
- Conexión de parques eólicos marinos.
- Suministro de energía a plataformas petrolíferas en altamar.

#### 2.1.3.1 Características del Conductor Submarino

Los cables submarinos presentan una composición similar a los cables aislados subterráneos y presentan los siguientes elementos [7]:

- Conductor.
- Pantalla del conductor y aislamiento.
- Sistema de aislamiento.
- Cubierta impermeable.
- Armadura.
- Cubierta exterior.

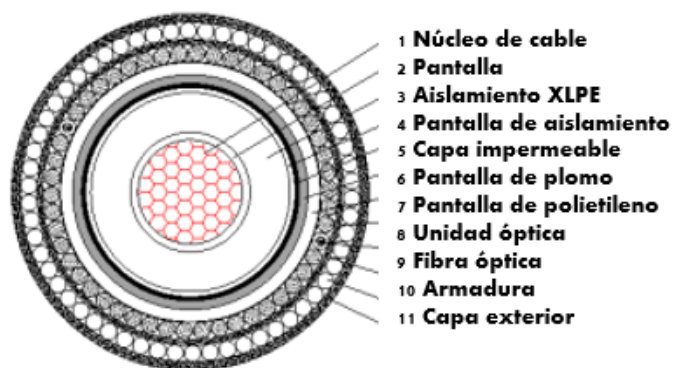
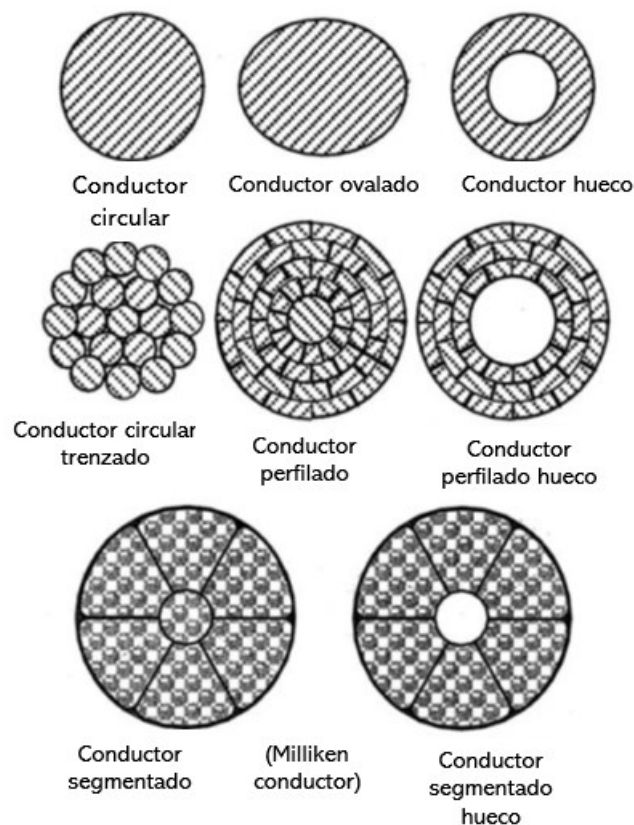


Figura 2.3 Composición de un conductor submarino [14]

**Conductor:** es el elemento donde circula la corriente eléctrica y puede ser de cobre o aluminio. Si bien es cierto el aluminio tiene un menor precio que el cobre, este último tiene una conductividad eléctrica mayor que la del aluminio ( $59.6 \times 10^6$  S/m frente a  $37.8 \times 10^6$  S/m del aluminio) resultando en que el cobre tenga un mayor uso debido a que su alta conductividad permite transportar la misma corriente con un conductor con un área menor [13].

Las resistencias eléctricas y áreas de los conductores están tabuladas en la norma IEC 60228, pero en los proyectos de conexiones submarinas suelen utilizarse cables hechos a la medida, con la finalidad de ajustarse de una mejor manera a los requerimientos y a las particularidades de cada ruta [13].

En la figura 2.4 se muestra los tipos de configuraciones del conductor.



**Figura 2.4** Tipos de configuraciones del conductor [15]

**Pantalla del conductor y aislamiento:** es una delgada capa de polietileno reticulado (XLPE) que completa las irregularidades en la superficie del conductor y no permite que la capa de aislamiento esté sometida a tensiones, lo que se traduce en un incremento de la resistencia del aislamiento a la ruptura dieléctrica. Entre el aislamiento y la pantalla del conductor se interpone una delgada capa que generalmente es de cobre. En conjunto estas tres capas (pantalla del conductor – aislamiento – pantalla del aislamiento) conforman el sistema dieléctrico del cable. Para obtener un cable de alta calidad, estas tres capas son fabricadas simultáneamente en un sistema de extrusión triple. Estas capas semiconductoras de XLPE están hechas de copolímeros basados en polietileno mezclados con un 40 % de carbono, que suelen tener un espesor entre 1 y 2 mm y representan una parte significativa del coste del cable debido al coste de los materiales de los que están hechas [13].

**Sistema de aislamiento:** provee una barrera eléctrica entre componentes sometidos a una alta diferencia de potencial (como por ejemplo entre el conductor y el ambiente). En la fabricación de cables submarinos se emplean los mismos materiales que para cables terrestres, los cuales hoy en día son, básicamente, polietileno (PE) y polietileno reticulado (XLPE).

El XLPE se fabrica entrelazando las largas cadenas moleculares del polietileno para formar una red tridimensional. Esto provoca que el material deje de ser termoplástico y sea estable a temperaturas mucho más altas, al contrario que el polietileno de baja densidad, que comienza a derretirse a partir de los 80 °C. El XLPE se destruye por pirólisis a los 300 °C.

Los cables con aislamiento de XLPE presentan un amplio rango de tensión de ruptura dieléctrica, la cual depende de la formulación concreta del material, las condiciones de fabricación, la temperatura, etc. Se pueden encontrar cables

resistentes a voltajes superiores a 550 kV. Pero el elemento que limita esta tensión máxima de las líneas subacuáticas son las uniones o empalmes, las cuales no suelen tener un aislamiento superior a 245-345 kV.

**Cubierta impermeable:** el aislamiento dieléctrico debe estar protegido del contacto con el agua. La mayoría de los cables submarinos tienen una cubierta metálica para proporcionar protección y estanqueidad al cable. Estas cubiertas suelen estar fabricadas de aluminio, plomo, cobre u otros metales, aunque también existen cubiertas poliméricas recubiertas de un agente absorbente bajo ella, consiguiendo estanqueidades y niveles de humedad similares a las metálicas.

**Armadura:** proporciona tanto estabilidad eléctrica como protección mecánica. Los cables submarinos están sometidos a fuerzas de tracción mecánica durante su instalación debido al peso del tramo de cable colgante y a los movimientos verticales de la embarcación. Por tanto, los cables submarinos deben estar provistos de una armadura que aporte la rigidez necesaria para soportar estas fuerzas. Además, debe proteger el conjunto del cable de otras agresiones externas como los aparejos de pesca y las anclas.

La armadura presenta un principal inconveniente que es que si se fabrica de un material magnético puede contribuir de forma muy significativa a las pérdidas originadas en el cable. Para evitar o disminuir en lo posible este problema se adoptan dos soluciones típicas, la primera consiste en uso de materiales no magnéticos en la armadura, como cobre, aleaciones de cobre o aluminio, pero esta alternativa tiene el inconveniente de que presenta un incremento de 25% en el precio y la resistencia mecánica es la mitad en comparación al acero; la segunda solución consiste en colocar una gran pantalla de cobre alrededor del conductor, la cual conduce una corriente inducida igual, pero de sentido contrario a la del conductor, de tal manera



que se cancelan sus campos magnéticos, la desventaja que presenta esta alternativa es que se generan pérdidas en la pantalla.

También se emplean materiales compuestos (a base de fibras de Kevlar, Vectran o Twaron) como armadura, que consiguen aportar la misma rigidez tensional que una armadura de cables de acero.

La armadura, que generalmente se hace de cables de acero, necesita protección ante la corrosión del agua marina. Para ello, se aplica una fina capa de zinc a los cables y un recubrimiento de betún.

**Cubierta exterior:** proporciona protección anticorrosión a la armadura, está cubierta por lo general es fabricada de polímeros extruidos o fibras enrolladas. Su función es proteger la capa de zinc y betún que recubre los cables de la armadura durante la fabricación, transporte e instalación del cable, así como durante el servicio bajo el agua, donde el cable puede verse sometido a diversos impactos.

### 2.1.3.2 Clasificación de Cables Submarinos

Los cables submarinos se los puede clasificar de acuerdo con los siguientes factores [16]:

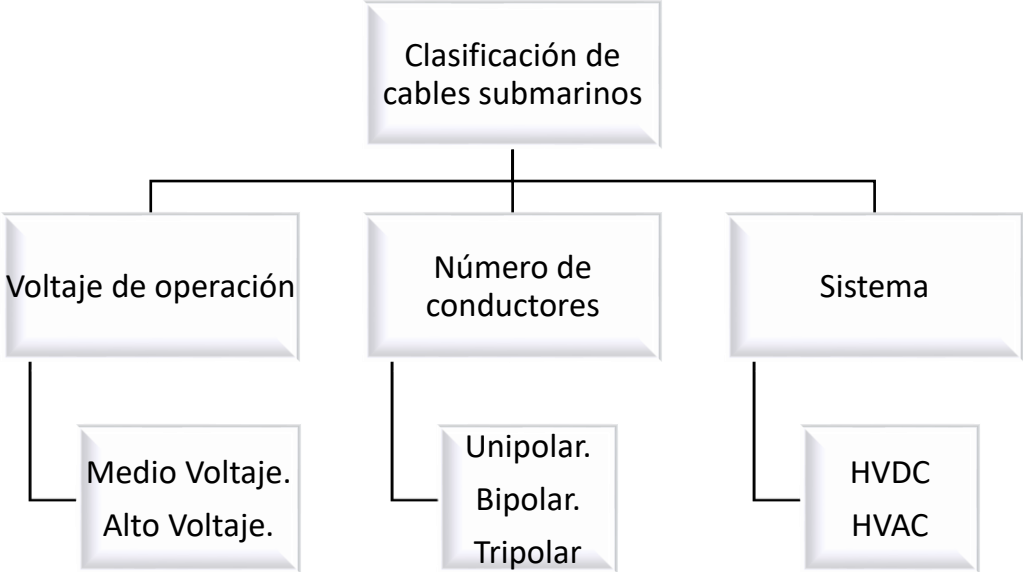


Figura 2.5 Clasificación de los cables submarinos

### **2.1.3.2.1 Según el Nivel de Voltaje de Operación**

**Cables de medio voltaje:** son diseñados para soportar voltajes entre 1kV y 40 kV, están conformados principalmente por el conductor, una capa formada por alambres de cobre (pantalla), una capa de material aislante y una capa formada por hilos de acero (armadura), la cual contiene una mayor cantidad de hilos que la pantalla de cobre [16].

**Cables de alto voltaje:** son diseñados para soportar voltajes mayores a 40 kV, son cables similares a los de medio voltaje en cuanto a su constitución se refiere. Estos, a diferencia de los cables de medio voltaje no cuentan con una capa formada por hilos de cobre sobre los conductores, en su lugar presentan una capa cilíndrica de plomo. Esto debido a que la capa de plomo es más confiable y segura, puesto que es un elemento que restringe por completo el paso del agua. En los cables diseñados para medio voltaje, utilizar capas de plomo resulta en un costo excesivo, por lo que se opta por utilizar una capa de cobre, que es muy resistente a la fatiga mecánica, y se utilizan otros métodos para no permitir la penetración del agua, como por ejemplo con el uso de materiales absorbentes [16].

### **2.1.3.2.2 Según el Número de Conductores**

**Unipolar:** consta de un único cable para la fase [16]. Entre las ventajas que presenta este tipo de cable es que cuenta una mejor disipación del calor generado en el cable (esto aumenta su ampacidad), puede almacenarse de una manera más compacta debido a que al ser un cable con un solo núcleo tiene un menor radio de flexión, su fabricación es más sencilla y económica. La desventaja que presenta es que requiere de una armadura diseñada para minimizar las pérdidas electromagnéticas que se generan en ella [13].

**Bipolar:** compuesto por dos cables, generalmente son usados en sistemas DC. En los sistemas DC, la configuración del cable bipolar permite que un cable conduzca la corriente en un sentido mientras que el otro cable es el retorno de la corriente en sentido contrario. La ventaja de los cables de corriente continua es que, en estado estable del sistema, no producen campos electromagnéticos variables, lo que conlleva a que no se generen pérdidas electromagnéticas en la armadura ni corrientes inducidas [13].

**Tripolar:** compuesto por tres cables distribuidos equiláteramente en un triángulo, trenzados entre sí. A diferencia del cable unipolar, en el cable tripolar los campos electromagnéticos se cancelan entre sí, por lo que, la armadura es de acero y con pérdidas no tan significativas [13].

#### **2.1.3.2.3 Según el Sistema**

**Sistemas High Voltage Direct Current HVDC:** la principal característica de estos sistemas es la separación de tensión y frecuencia entre el sistema de generación y la red o instalación en tierra, esta particularidad influye de manera directa en el costo total del proyecto y en la confiabilidad del sistema [16].

La transmisión de energía DC presenta ventajas económicas frente a la AC en distancias largas, lo que resulta ideal para la interconexión de parques eólicos offshore [17].



Cable monopolar



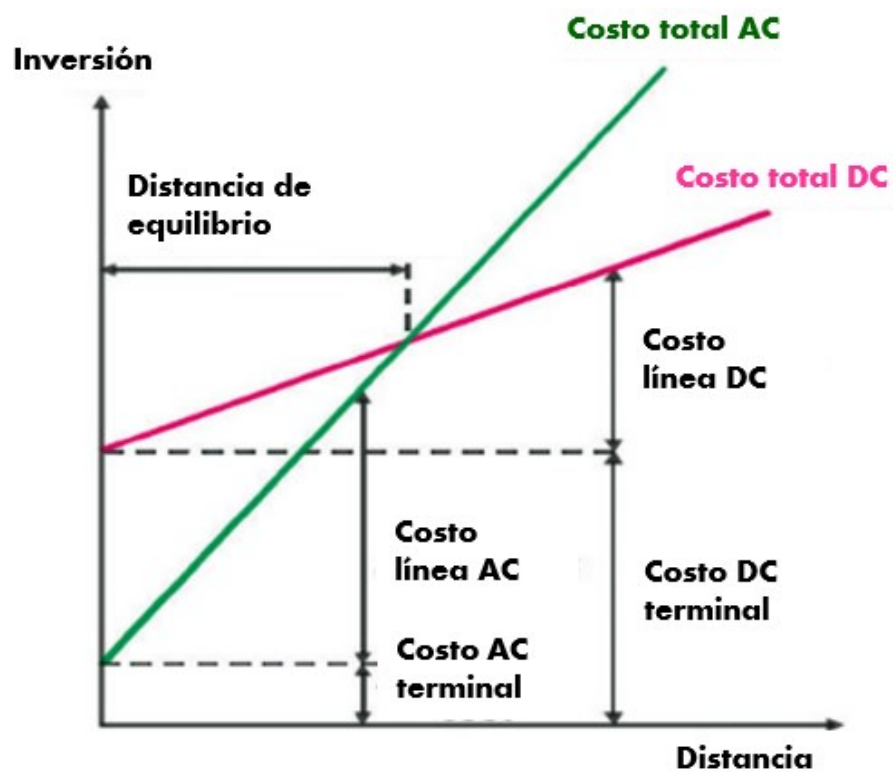
Cable bipolar



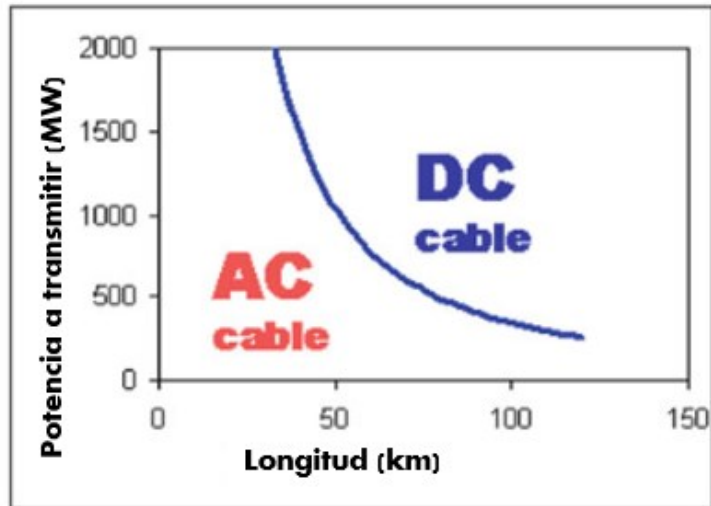
Cable tripolar

**Figura 2.6** Clasificación de cables según el número de conductores [15]

**Sistemas High Voltage Alternating Current HVAC:** en estos sistemas la capacidad de transmisión de energía es limitada y se debe a la distancia existente entre el punto de envío y el punto de recepción. Esta distancia determina la potencia reactiva que será requerida por el cable, debido a que en los sistemas HVAC se genera una corriente capacitiva resultante del comportamiento como capacitor que experimenta el material aislante del cable al transportar tal energía [16]. Este comportamiento es más significativo en cables de gran longitud, donde la mayor parte de la capacidad de transmisión de energía que posee el cable es consumida por esta corriente capacitiva (o corriente reactiva), lo que se traduce en una reducción en la transmisión de potencia activa que es requerida por la red en tierra. Además, dicha corriente capacitiva induce a su vez pérdidas en el sistema que se presenta como un calentamiento del cable, lo que resulta en la disminución de la eficiencia del sistema [18].



**Figura 2.7** Punto de equilibrio entre un sistema HVAC vs HVDC [19]



**Figura 2.8** Rango de conveniencia del sistema HVAC vs HVDC [19]

En la tabla 2.1 se muestra la comparativa entre las tecnologías de transmisión mencionadas [20].

**Tabla 2.1** Comparación entre transmisión AC y DC

Tipo de tecnología	Ventajas	Limitaciones
AC	Simple. Poco mantenimiento. Alta disponibilidad.	Cable pesado. Máxima longitud entre 50 y 150 km. Requiere compensación reactiva. Alta corriente de cortocircuito.
DC	Menor número de cables, por ende, es más ligero. No hay límites de longitud. Bajas pérdidas en conductores y convertidores. Alta transmisión de potencia.	Necesita una red AC robusta. Requiere de mayor espacio físico. Requiere de equipos especiales como filtros, convertidores, etc.

## 2.2 Parámetros Eléctricos de los Cables Submarinos

Para calcular tanto los parámetros serie como paralelo de un cable submarino es necesario realizar un análisis electromagnético, el que depende principalmente de la geometría de los cables y de las propiedades de los materiales [15], [21]. Para el caso del análisis de una línea de transmisión submarina se puede asumir que el océano es infinito simplificando el grado de complejidad del análisis [21].

### 2.2.1 Parámetros Serie

**Resistencia:** es la propiedad más importante de un conductor [15], y se define como la oposición que presenta un material al paso de la corriente, lo que ocasiona el calentamiento del material y por ende las pérdidas eléctricas. La resistencia AC de un conductor está definida por [22]:

$$R_{AC} = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \frac{l}{2\pi R_{cond}} \quad (2.1)$$

donde  $f$  es la frecuencia de la red,  $\mu$  representa la permeabilidad,  $\sigma$  la conductividad eléctrica,  $l$  la longitud y  $R_{cond}$  es el radio del conductor.

La resistencia AC que presenta el conductor es dependiente de la resistencia DC, del efecto piel y la proximidad con otros conductores. Además, influyen las pérdidas sobre el material aislante [23].

**Inductancia:** se define como la propiedad que tiene el conductor que se opone a los cambios bruscos de la corriente. Puesto que el cable submarino está compuesto por varias capas de distintos materiales, estos se deben de considerar para calcular la inductancia.

Si se asume que la línea es transpuesta, la inductancia que existe entre cables separados viene dado por [22]:

$$L_{an} = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{cb}}}{r_{cond}} \right) \quad (2.2)$$

donde  $L_{an}$  representa la inductancia del conductor,  $D_{ab}D_{ac}D_{cb}$  son las distancias entre los centros de los conductores y  $r_{cond}$  es el radio del conductor.

Para el caso de un cable tripolar, que es comúnmente utilizado en sistemas de transmisión submarinos, el análisis consiste en que los campos magnéticos y eléctricos de cada conductor interactúan entre sí y forman campos variables en dos

dimensiones. El campo magnético que existe fuera del grupo de conductores es igual a la suma de las componentes del campo magnético que aporta cada conductor.

En la figura 2.9 se muestra la disposición geométrica del cable tripolar.

De acuerdo con la notación de la figura 2.9 el radio equivalente de cada fase viene dado por:

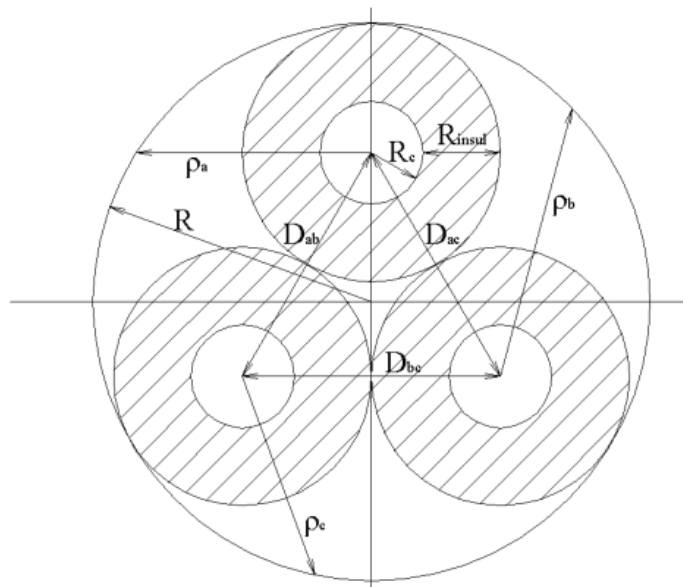
$$\rho_a = \sqrt{\left(R \sin(\varnothing) - \frac{2}{\sqrt{3}}(R_{insul} + R_c)\right)^2 + (-R \cos(\varnothing))^2} \quad (2.3)$$

$$\rho_b = \sqrt{\left(R \sin(\varnothing) + \frac{\sqrt{3}}{3}(R_{insul} + R_c)\right)^2 + (R_{insul} + R_c - R \cos(\varnothing))^2} \quad (2.4)$$

$$\rho_c = \sqrt{\left(R \sin(\varnothing) + \frac{\sqrt{3}}{3}(R_{insul} + R_c)\right)^2 + (R_{insul} - R_c - R \cos(\varnothing))^2} \quad (2.5)$$

donde  $\rho_a, \rho_b, \rho_c$  dependen de la ubicación dentro del círculo de radio R.

Estos radios de fase se pueden utilizar para calcular el campo magnético equivalente de un conductor de radio R, siempre y cuando el radio R encierre a los tres núcleos de los conductores enteramente [22].



**Figura 2.9** Geometría de un cable tripolar [22]

La inductancia de un cable tripolar puede ser determinada calculando el flujo magnético en las diferentes superficies del cable. El flujo magnético está dado por:

$$\psi = \oiint B \, dS \quad (2.6)$$

$$\psi = \frac{I}{2\pi} \int_{\rho=a}^{\rho=b} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \left[ \frac{1}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_b} + \frac{1}{\rho_c} \right] d\rho \, d\phi \quad (2.7)$$

La inductancia concentrada puede ser determinada mediante la relación entre el flujo y la corriente:

$$L = \frac{N \Psi}{I} \quad (2.8)$$

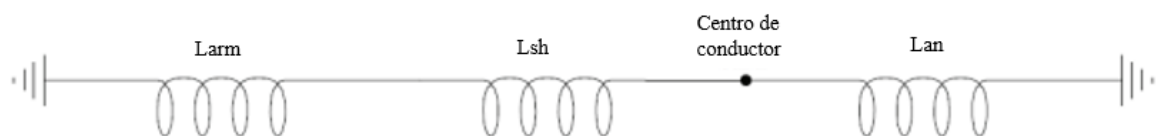
Para el caso de una línea de transmisión  $N = 1$ , por ende, la inductancia es igual a:

$$L = \frac{1}{2\pi} \int_{\rho=a}^{\rho=b} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \left[ \frac{1}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_b} + \frac{1}{\rho_c} \right] d\rho \, d\phi \quad (2.9)$$

Con lo que se pueden calcular las inductancias de cada una de las capas del cable.

Las inductancias de cada una de las capas y las inductancias mutuas se pueden utilizar para determinar la inductancia total de la línea de transmisión.

En la figura 2.10 se muestra los componentes inductivos del cable.



**Figura 2.10** Componentes inductivos por fase [22]



Donde  $L_{an}$  es la inductancia a tierra propia e inductancia mutua de cada fase del conductor,  $L_{arm}$  es la inductancia de la capa de armadura y  $L_{sh}$  es la inductancia de capa de plomo.

La aproximación de la inductancia propia y mutua de cada conductor de fase viene dada por [22]:

$$L_{an} = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{D_{AB}}{e^{-\frac{1}{4}} r_{cond}} \right) \quad (2.10)$$

donde  $D_{AB}$  representa la distancia entre los conductores,  $r_{cond}$  es el radio del conductor y  $e^{-\frac{1}{4}} r_{cond}$  es el radio medio geométrico.

La inductancia equivalente de cable tripolar submarino está dada por [22]:

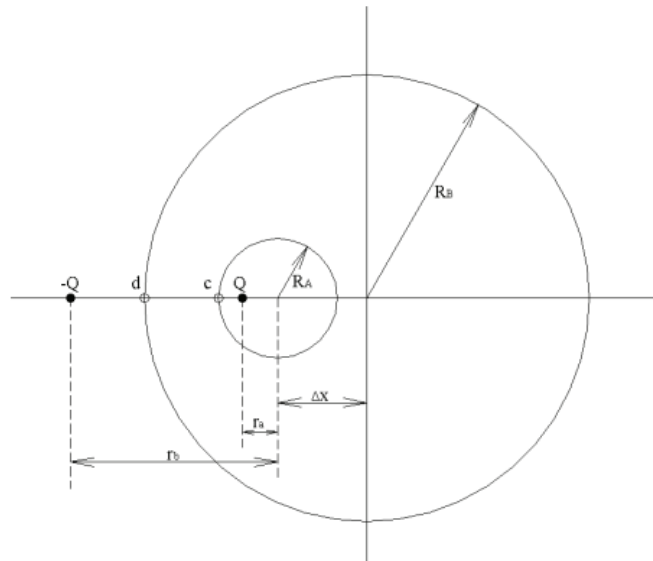
$$L_{eq} = \frac{(L_{arm} + L_{sh}) L_{an}}{(L_{arm} + L_{sh}) + L_{an}} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 Parámetro Paralelo de los Cables Submarinos

**Capacitancia:** está relacionada con el campo que existe entre dos elementos conductores. La capacitancia por fase de un cable submarino se puede determinar como la capacitancia entre cada conductor y la envoltura y la capacitancia entre cada conductor y las fases de los conductores restantes. La capacitancia equivalente a tierra debido a las fases puede ser determinada de acuerdo con la siguiente expresión [22]:

$$C_{an} = \frac{2 \pi \varepsilon}{\ln \left( \frac{2(R_{insul} + R_c)}{R_c} \right)} \quad (2.12)$$

La capacitancia entre cada fase y la envoltura puede ser determinada por medio del método de las imágenes [22].



**Figura 2.11** Método de las Imágenes [22]

Para conductores cilíndricos como se muestra en la figura 2.11 y usando el método de las imágenes, se obtiene la expresión para la capacitancia entre el conductor y la envoltura, la cual viene dada por [22].

$$C = \frac{2 \pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{R_A}{R_B} \left(1 + \frac{\Delta x}{r_a}\right)\right)} \quad (2.13)$$

donde:

$$R_A = R_C \quad (2.14)$$

$$R_B = R \quad (2.15)$$

$$\Delta x = \frac{2}{\sqrt{3}} (R_{insul} + R_C) \quad (2.16)$$

$$r_a = \frac{(R_B^2 - R_A^2 - \Delta x^2) \pm \sqrt{(R_B^2 - R_A^2 - \Delta x^2)^2 - 4(R_A^2 \Delta x^2)}}{2\Delta x} \quad (2.17)$$

### 2.3 Análisis de Redes

Una vez identificados los parámetros eléctricos de los cables submarinos (resistencia, inductancia y capacitancia) mediante el análisis electromagnético se

puede realizar el modelo de la red de dos puertos para definir la relación entre los datos de entrada y salida de la red.

### 2.3.1 Red de Dos Puertos

Una red puede tener dos o más terminales, pero en términos de estudios las más importante son las que cuentan con cuatro terminales agrupadas en pares [24].

La representación de una red de dos puertos se muestra en la figura 2.12.

Para la red de dos puertos se requiere obtener una solución de la siguiente forma [21]:

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (2.18)$$

$$I_s = CV_r + DI_r \quad (2.19)$$

donde  $V_s$  e  $I_s$  son el voltaje y corriente de envío mientras que  $V_r$  e  $I_r$  son el voltaje y corriente de recepción.

Los parámetros ABCD se puede definir como [25]:

A: Relación de voltaje de circuito abierto.

$$A = \frac{V_1}{V_2}; I_2 = 0 \quad (2.20)$$

B: Impedancia negativa de transferencia en cortocircuito.

$$B = -\frac{V_1}{I_2}; V_2 = 0 \quad (2.21)$$

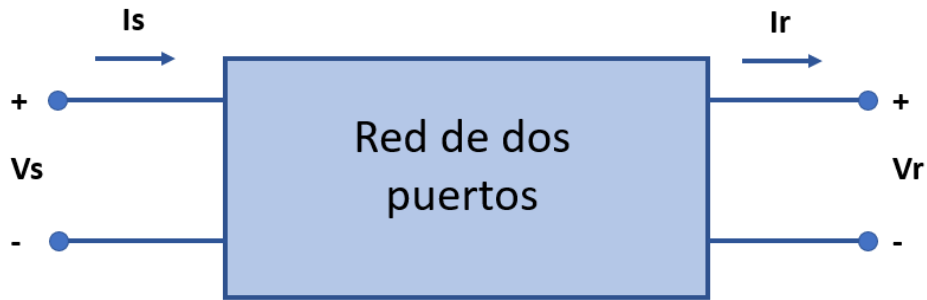
C: Admitancia de transferencia en circuito abierto.

$$C = \frac{I_1}{V_2}; I_2 = 0 \quad (2.22)$$

D: Relación negativa de corrientes en cortocircuito.

$$D = -\frac{I_1}{I_2}; V_2 = 0 \quad (2.23)$$

En donde A y D son adimensionales, B se mide en Ohmios y C en Siemens.



**Figura 2.12** Representación de red de dos puertos

### 2.3.2 Modelos de Líneas de Transmisión

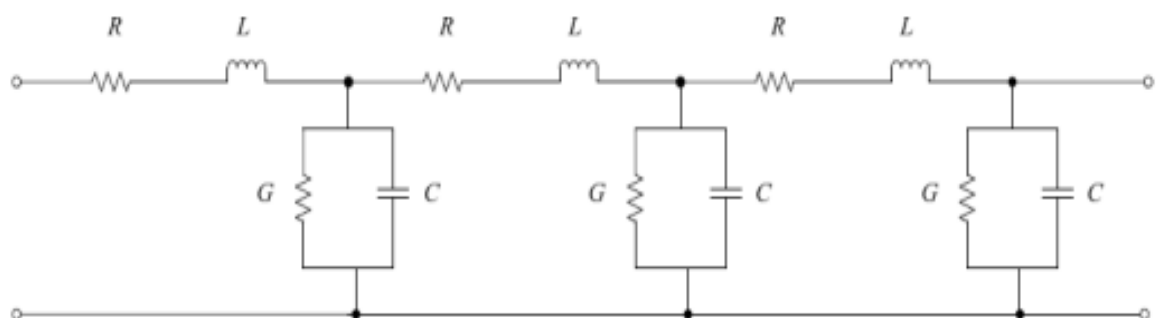
Las líneas de transmisión son circuitos de constantes distribuidas (resistencia, inductancia, capacitancia, conductancias), que se encuentran distribuidas a lo largo de su longitud [26].

Una línea de transmisión se puede clasificar según su longitud como:

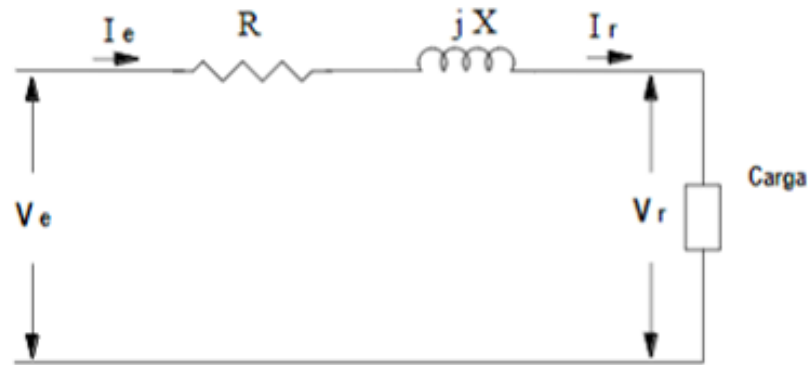
- Líneas cortas: longitud menor a 80 km.
- Líneas medias: longitud entre 80 y 250 km.
- Líneas largas: longitud entre 250 y 360 km.
- Líneas muy largas: longitud mayor a 360 km.

#### 2.3.2.1 Modelo de Línea Corta

En este modelo de línea debido a que la capacitancia en paralelo es pequeña se la puede omitir del análisis, por lo que se consideran únicamente la resistencia y la inductancia de la línea.



**Figura 2.13** Representación distribuida de una línea de transmisión [26]



**Figura 2.14** Modelo de línea corta [26]

De forma generalizada se puede describir las ecuaciones en términos de los parámetros ABCD.

$$A = 1; B = Z; C = 0; D = 1 \quad (2.24)$$

### 2.3.2.2 Modelo de Línea Media

Puede ser modelada con gran precisión considerando la resistencia e inductancia como parámetros concentrados. Debido a que para los cálculos de líneas de transmisión media se incluye la capacitancia de la línea, esta puede ser representada mediante dos modelos ampliamente estudiados: el modelo T nominal, si la admitancia total se considera concentrada en el punto medio del circuito que representa a la línea, y modelo  $\pi$  nominal, si la admitancia se asume distribuida en dos partes iguales en los extremos de la línea [26].

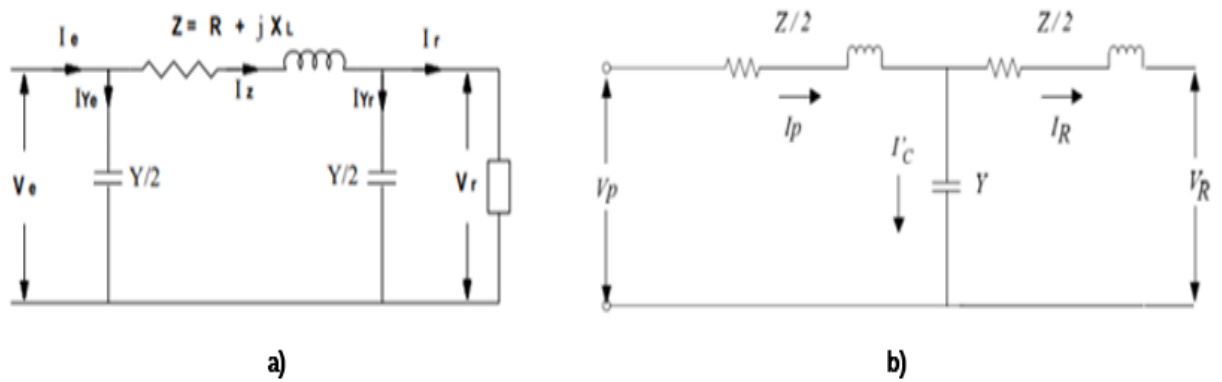
En términos de los parámetros ABCD resultan las siguientes expresiones.

$$A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad (2.25)$$

$$B = Z \quad (2.26)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \quad (2.27)$$

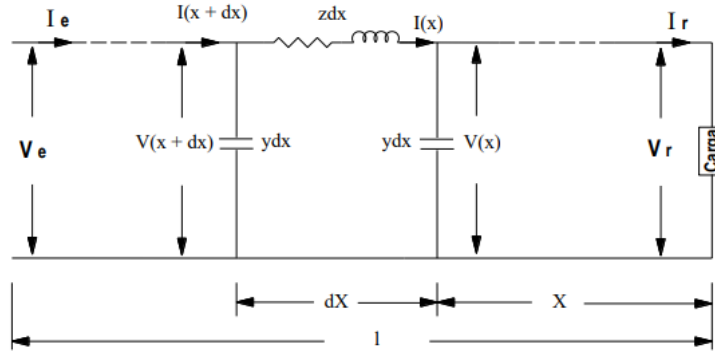
$$D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad (2.28)$$



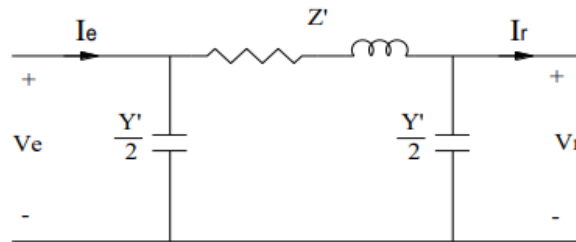
**Figura 2.15** Modelo de línea media a) Modelo PI. b) Modelo T [26]

### 2.3.2.3 Modelo de Línea larga y Muy larga

Para estos tipos de líneas de transmisión el usar los modelos T y  $\pi$  nominal no brinda una representación exacta de la línea, debido a que se debe considerar la capacitancia distribuida y su relación con la impedancia de la línea además de considerar longitud incremental de la línea. Para ello, se puede dividir la línea en un número infinito de segmentos de los cuales se requiere de una solución apropiada para las ecuaciones diferenciales planteadas. En estos modelos de línea, la impedancia serie y la admitancia en paralelo se suponen distribuidas uniformemente a lo largo de toda la línea. La figura 2.16 muestra la distribución de las constantes eléctricas de la línea de transmisión, la cual representa una sección de línea cuyo diferencial de longitud es definido por  $dx$ .  $V(x)$  e  $I(x)$ , representan el voltaje y la corriente en la posición  $x$ , los cuales son medidos desde la derecha, o extremo receptor de la línea. De igual forma,  $V(x + dx)$  e  $I(x + dx)$  representan el voltaje y la corriente en la posición  $(x + dx)$  [26].



**Figura 2.16** Línea larga con parámetros distribuidos [26]



**Figura 2.17** Modelo Pi de una línea larga [26]

En términos de los parámetros ABCD resultan las siguientes expresiones.

$$A = \cosh \gamma l \quad (2.29)$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l \quad (2.30)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l \quad (2.31)$$

$$D = \cosh \gamma l \quad (2.32)$$

### 2.3.3 Diagrama de Potencia

El diagrama de círculo de potencia es un método analítico-gráfico utilizado para obtener las características y el comportamiento de una línea de transmisión [27].

Parte de la base de los parámetros ABCD y de las ecuaciones planteadas para la red de dos puertos:

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (2.33)$$

$$I_r = \frac{V_s - AV_r}{B} \quad (2.34)$$

Se define:

$$A = |A|\angle\alpha \quad B = |B|\angle\beta \quad (2.35)$$

$$V_r = |V_r|\angle 0 \quad V_s = |V_s|\angle\delta \quad (2.36)$$

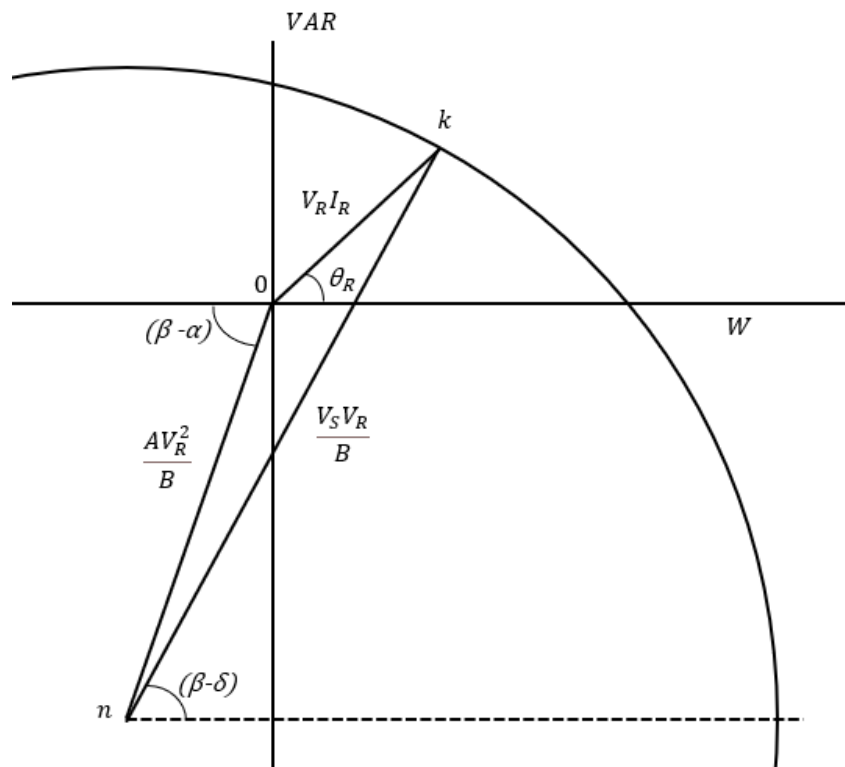
De donde se obtiene:

$$I_r = \left| \frac{V_r}{B} \right| \angle \delta - \beta - \frac{|A||V_r|}{B} \angle \alpha - \beta \quad (2.37)$$

La potencia compleja  $V_r I_r^*$  en el extremo receptor es:

$$P_r + jQ_r = \frac{|V_s||V_r|}{|B|} \angle \beta - \delta - \frac{|A||V_r|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha \quad (2.38)$$

Como se puede observar la expresión de la potencia compleja  $P_r + jQ_r$  resulta de la combinación de dos fasores expresados en forma polar, por lo que se pueden graficar ambos factores en el plano complejo donde las coordenadas en el plano horizontal y vertical estarán en unidades de potencia, Watts y Voltios Amperios reactivos respectivamente [28], tal como se muestra en la figura 2.18.



**Figura 2.18** Diagrama de flujo de potencia [28]



## 2.4 Superconductores

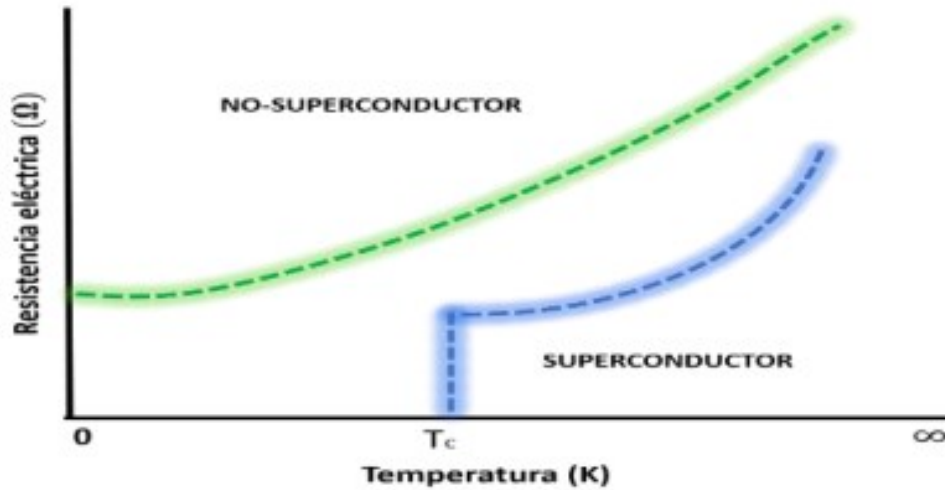
La superconductividad es la capacidad específica que presentan ciertos materiales que bajo determinadas condiciones pueden transportar corriente eléctrica con resistencia y pérdidas de energía cercanas a cero [8].

En [29] se muestra la siguiente definición de superconductividad:

*“La superconductividad es un estado de la materia el cual presenta una peculiar combinación de propiedades eléctricas y magnéticas; y que se alcanza cuando ciertos metales son enfriados a temperaturas extremadamente bajas”*

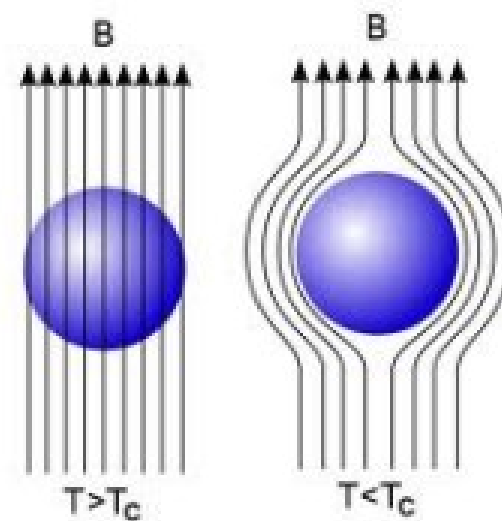
Como se puede observar en la figura 2.19, la pérdida de resistencia eléctrica se presenta cuando se enfría un material superconductor por debajo de su temperatura crítica [8].

En términos de superconductividad se presentan efectos magnéticos notables. En 1913, el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes, observó que un material superconductor regresa a su estado conductor cuando este es sometido a un campo magnético intenso. Este fenómeno se presenta incluso si el superconductor se encuentra enfriado por debajo de su temperatura crítica ( $T < T_c$ ), este campo se denomina campo crítico  $H_c$  y varía con la temperatura, por lo que el estado de superconductividad es estable dentro de un rango valores de temperatura y campo magnético, a estos rangos se los denomina diagrama de fase magnético H-T [29].



**Figura 2.19** Comparación de la resistencia eléctrica de un no superconductor y superconductor con respecto al cambio en la temperatura [9]

En 1933, los físicos alemanes Walther Meissner y Robert Ochsenfeld descubrieron que ciertos tipos de materiales no pueden ser atravesados por un campo magnético este descubrimiento fue denominado "efecto Meissner", o también llamado "efecto Meissner-Ochsenfeld". Este descubrimiento resulta en una de las pruebas a las que debe someterse un material con la finalidad de comprobar si es o no superconductor, pues si un superconductor es colocado sobre un imán la permeabilidad del material disminuye hasta cero y el flujo magnético en el material desaparece [8].



**Figura 2.20** Comportamiento del campo magnético B en un superconductor [8]

Una forma de explicar el efecto Meissner es que al enfriar un superconductor por debajo de su temperatura crítica  $T_c$  y someterlo a un campo magnético (menor al campo crítico), se originan corrientes eléctricas en la superficie del material, estas corrientes circulan de tal forma que producen un campo magnético opuesto al campo magnético aplicado provocando la anulación del campo magnético dentro del superconductor. Esta corriente superficial se denomina corriente de apantallamiento [29].

Es decir, que para que un material se considere superconductor debe de cumplir básicamente dos condiciones [30]:

- Resistencia nula.
- Efecto Meissner-Ochsenfeld

Los superconductores tienen dos parámetros para explicar su comportamiento que son  $\lambda$  (longitud de penetración) y  $\xi$  (longitud de coherencia). La longitud de penetración representa la distancia a la cual es capaz de penetrar el campo magnético dentro de un material, y la longitud de coherencia es la distancia en la varía el parámetro de orden en un superconductor (distancia que ocupa una pareja de electrones o par de Cooper) [30].

## ***2.4.1 Propiedades Magnéticas de los Superconductores Tipo I y Tipo II***

### **2.4.1.1 Superconductores Tipo I**

Son aquellos materiales que debido a sus propiedades en estado superconductor no permiten que penetre un campo magnético externo, esto lleva a un esfuerzo energético muy alto, y puede llegar hasta una ruptura brusca del estado superconductor si se llegara a superar la temperatura crítica [8]. Por lo general son

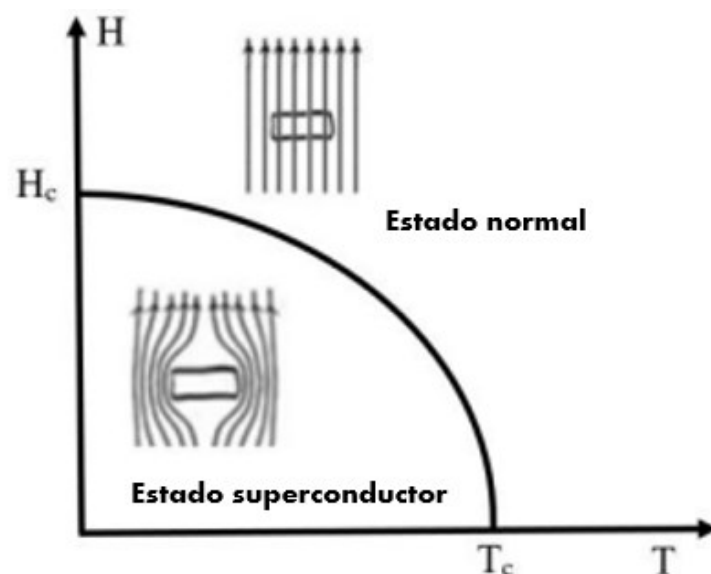
metales de punto de fusión bajos y muy puros. Se caracteriza por el parámetro de Ginzburg-Landau “ $\kappa$ ” menor que  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  y se define como [30]:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.39)$$

En la tabla 2.2 se muestra la temperatura y campo crítico de varios tipos de elementos que cumplen con las características de superconductor tipo I.

**Tabla 2.2** Temperatura y Campo críticos de superconductores tipo I

Material	T <sub>c</sub> /°K	H <sub>c</sub> / mT
Aluminio	1.2	10
Cadmio	0.52	2.8
Indio	3.4	28
Plomo	7.2	80
Mercurio	4.2	41
Tántalo	4.5	83
Talio	2.4	18
Estaño	3.7	31
Titanio	0.40	5.6
Zinc	0.85	5.4



**Figura 2.21** Diagrama de fase de un superconductor tipo I [31]

### 2.4.1.2 Superconductores Tipo II

Este tipo de superconductores son considerados imperfectos, debido a que el campo magnético penetra al superconductor a través de pequeñas canalizaciones denominadas vórtices de Abrikosov, o fluxones, sin destruir el estado superconductor y se define como [30]:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.40)$$

Como se aprecia en la figura 2.22, los superconductores tipo II presentan tres fases, la de superconducción cuando el campo es menor al campo crítico  $H_{c1}$ , la de estado mixto cuando el campo se encuentra entre los campos críticos  $H_{c1}$  y  $H_{c2}$ ; es en esta fase donde se presentan los vórtices de Abrikosov y la fase de estado normal que se presenta cuando la temperatura y el campo exceden los valores críticos.

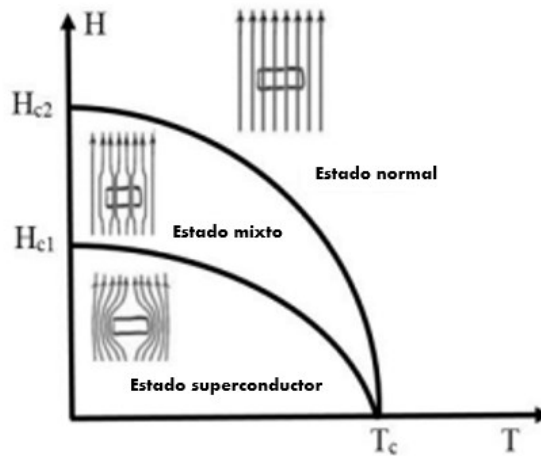


Figura 2.22 Diagrama de fase de un superconductor tipo II [31]

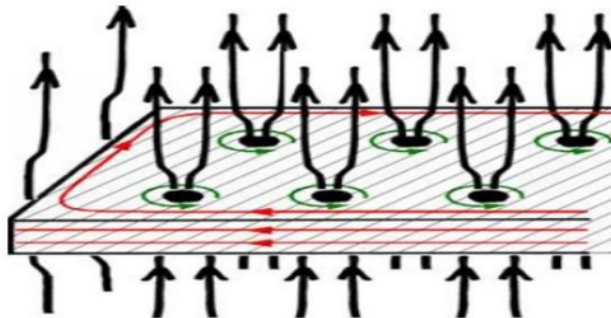


Figura 2.23 Estado mixto de un superconductor tipo II (campo magnético en color negro, corriente de pantalla en color rojo, corriente superconductor en verde) [31]

**Tabla 2.3** Temperatura y Campo críticos de superconductores tipo II

<b>Compuesto</b>	<b>T<sub>c</sub> /°K</b>	<b>H<sub>c</sub> / mT</b>
NbZr	11	8.3
NbGe	23.6	37
NbAl	19.1	29.5
YBaCuO	93	140
BiSrCaCuO	92	107

## **2.4.2 Superconductores de Alta y Baja Temperatura**

### **2.4.2.1 Superconductores de Baja Temperatura (LTS)**

Son elementos con la capacidad de transportar corriente eléctrica sin resistencia a una temperatura crítica de 25°K. Un cable superconductor LTS necesita una cubierta refrigerante a su alrededor para mantenerlo a una temperatura inferior a la temperatura crítica del material que lo constituye. Circula dentro de la cubierta refrigerante helio líquido (4,2°K) [7].

### **2.4.2.2 Superconductores de Alta Temperatura (HTS)**

Los HTS son de tipo II [27]. Son elementos capaces de transportar corriente sin resistencia a la temperatura del nitrógeno líquido (77°K). A diferencia de la tecnología LTS, los cables HTS no requieren de helio líquido para su refrigeración [7].

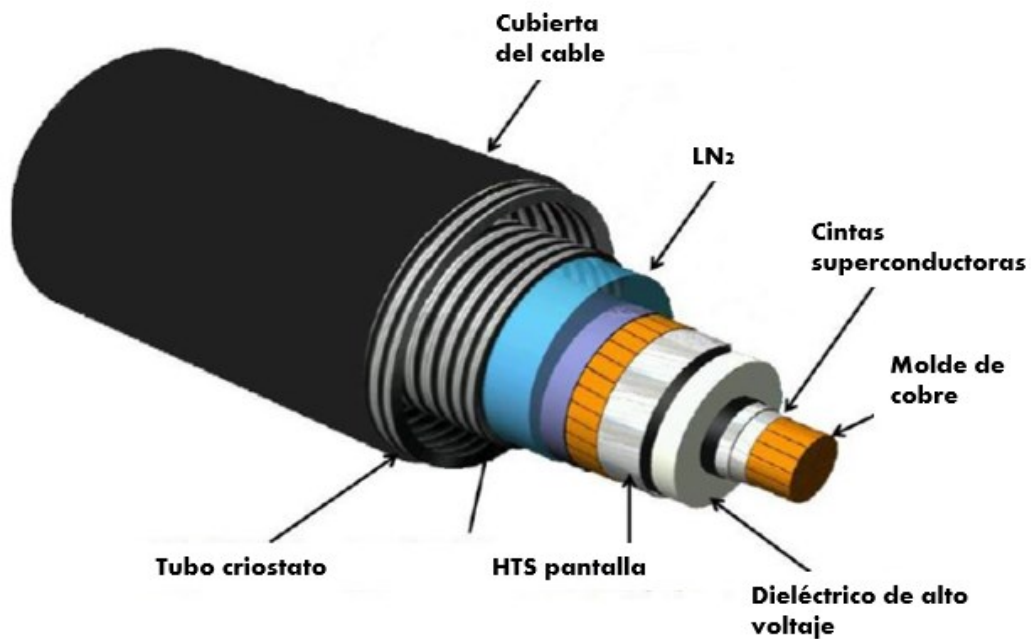
Este tipo de superconductor presenta dos inconvenientes a ser considerados, uno es que son relativamente frágiles y por otro lado es su granularidad nos les permite conducir grandes cantidades de corriente en presencia de campos magnéticos [32].

### **2.4.3 Estructura de un Cable Superconductor**

Un cable superconductor está formado por una o más capas de cintas superconductoras enrolladas helicoidalmente alrededor de un molde de cobre flexible, que puede ser un tubo hueco o un haz de hilos de cobre según los requisitos de

estabilidad. Las capas de superconductores están rodeadas por una capa dieléctrica, que básicamente es PPLP (papel laminado de polipropileno). PPLP es un buen dieléctrico para operar a bajas temperaturas, además de ser un buen conductor térmico para eliminar el calor presente en las cintas superconductoras. Seguido de la capa dieléctrica se encuentra una o varias capas de cintas superconductoras que hacen la función de pantalla o en el caso de cables triaxiales son las otras fases. Luego se presenta el espacio para el flujo de nitrógeno líquido, seguido un criostato cilíndrico al vacío con aislamiento multicapa y una cubierta protectora exterior [33].

En la figura 2.24 se muestran los componentes básicos presentes en un cable superconductor de alta temperatura.



**Figura 2.24** Diseño de un HTS monofásico para operación AC [34]

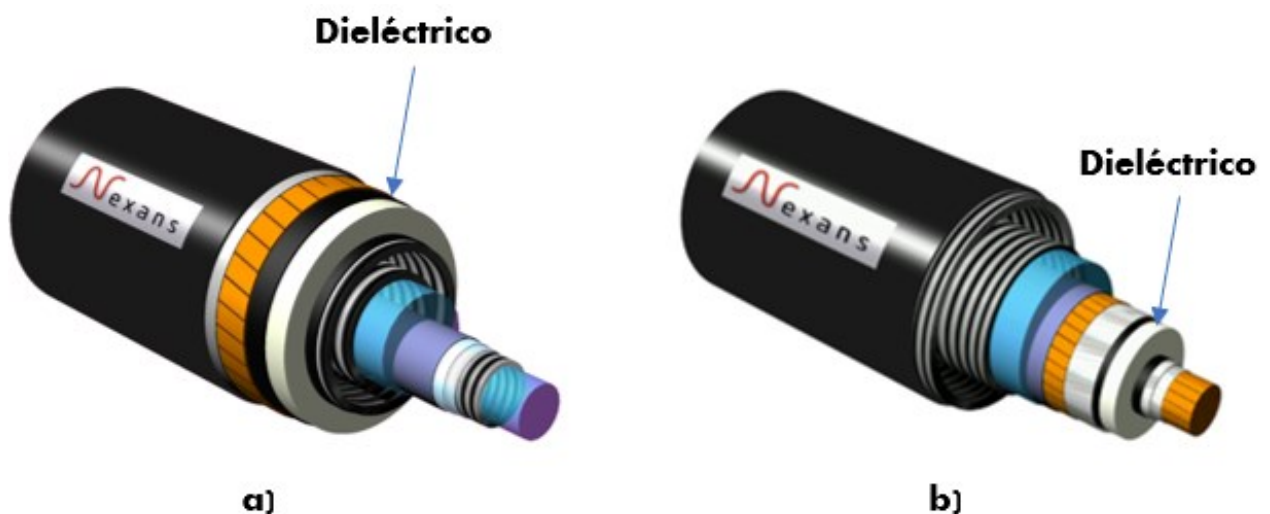
**Tabla 2.4** Capas de un cable superconductor

Capa	Función
Molde de cobre	Es el marco del cable y conduce una cantidad de corriente de sobrecarga cuando se presenta una falla en un tramo del cable para evitar que las cintas superconductoras sufran daños permanentes.
Cintas superconductoras	Conduce la corriente, múltiples capas conductoras pueden aumentar la capacidad de transporte de corriente.
Dieléctrico PPLP	Capa de aislamiento capaz de soportar altos voltajes en un medio criogénico.
Pantalla superconductora	Esta pantalla previene la fuga del campo electromagnético.
Refrigerante criogénico	Provee constantemente nitrógeno líquido para refrigerar al superconductor por debajo de su temperatura crítica.
Criostato interior y exterior	Vacío entre la capa interior y exterior puede proveer aislamiento térmico para evitar fugas térmicas.

#### 2.4.4 Categorías de Cables Superconductores

Los cables superconductores se clasifican en dos categorías en función de la posición de la capa de aislamiento en el cable y estas son [33]:

- Dieléctrico caliente (WD, Warm Dielectric), el aislamiento se encuentra a temperatura ambiente, es decir, se encuentra ubicado fuera del criostato exterior.
- Dieléctrico frío (CD, Cold Dielectric), el aislamiento se encuentra a temperatura criogénica, se encuentra ubicado entre el criostato interior y la pantalla superconductora.



**Figura 2.25** a) Superconductor WD, b) Superconductor CD [6]



La mayor diferencia entre estos dos tipos de superconductores es el tipo de aislamiento que utilizan, los superconductores WD usan el polietileno reticulado XLPE mientras que los superconductores CD usan papel laminado de polipropileno PPLP [33].

En la tabla 2.5 se muestra la comparación entre el superconductor de dieléctrico frío y el caliente.

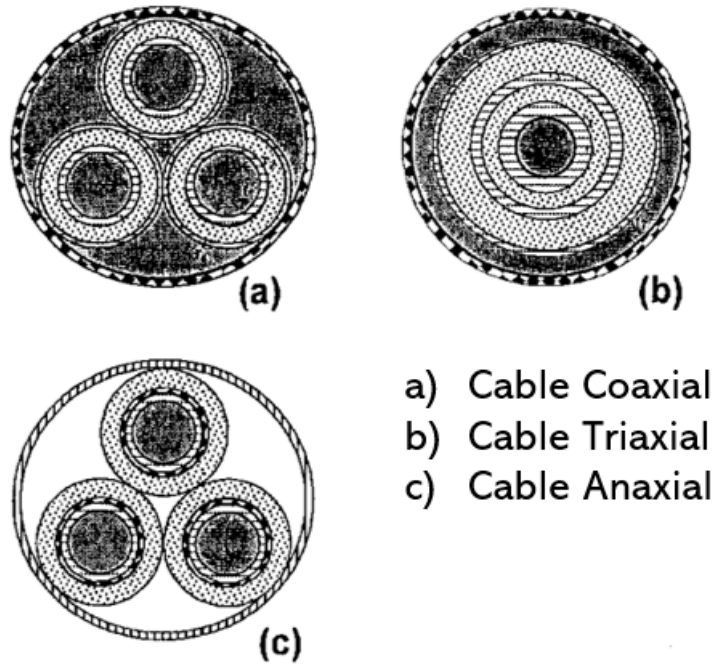
**Tabla 2.5** Comparación entre superconductor WD y CD

<b>Características</b>	<b>Dieléctrico Caliente (WD)</b>	<b>Dieléctrico Frío (CD)</b>
Campo magnético exterior	Si	No
Pérdidas	Altas	Bajas
Capacidad de corriente	Alta	Muy Alta
Dieléctrico	XLPE	PPLP
Consumo de material superconductor	Bajo	Alto (pantalla)
Inductancia	Simular a los cables convencionales	Muy baja

#### **2.4.5 Configuración de Cables**

De acuerdo con la disposición de la capa superconductora para cada fase y en la tensión de funcionamiento, se han desarrollado diversas configuraciones de cables superconductores trifásicos, las que se dividen en [33]:

- Tres conductores monofásicos separados en tres criostatos (coaxial).
- Tres fases diferentes enrolladas de forma concéntrica en un único molde contendidas en un único criostato (triaxial).
- Tres conductores monofásicos en un mismo criostato (anaxial).



**Figura 2.26** Configuración de cables superconductores [35]

**Tabla 2.6** Ventajas y desventajas entre las configuraciones de cable superconductor [35].

Configuración	Ventajas	Desventajas
Tres conductores monofásicos separados en tres criostatos (coaxial).	Bajas pérdidas. No requiere pantalla metálica	Requiere de más elementos que el tipo de tres conductores en un mismo criostato. Pérdidas en el dieléctrico a temperatura crítica.
Tres fases diferentes enrolladas de forma concéntrica en un único molde contenidas en un único criostato (triaxial).	Bajas pérdidas. Se requiere menor espacio que el diseño coaxial y más que el anaxial.	En caso de desperfecto o daño se deben de reemplazar las tres fases. Pérdidas en el dieléctrico a temperatura crítica.
Tres conductores monofásicos en un mismo criostato (anaxial).	Pérdidas en dieléctrico a temperatura ambiente. Se requiere menor espacio que el diseño coaxial	Pérdidas en la pantalla metálica. Consumo elevado de potencia reactiva.

#### 2.4.6 Componentes de un Sistema Eléctrico con Cables Superconductores

Los componentes principales que se deben de considerar para la implementación de un sistema eléctrico con cables superconductores son:

- Terminaciones de cables superconductores a redes eléctricas.
- Uniones de cables superconductores (empalmes entre cables superconductores).
- Sistema de refrigeración.
- Componentes del sistema de refrigeración criogénica (refrigerador, bomba de nitrógeno líquido, intercambiador de calor, tanque de nitrógeno líquido).

## 2.4.7 Parámetros del Cable Superconductor

### 2.4.7.1 Parámetros Serie

**Resistencia:** como se mencionó a inicios de la sección 2.4 un superconductor es un material que no presenta resistencia eléctrica. Esta premisa ocasiona un problema cuando se trabaja con la ley de Ohm, que desde el punto de vista microscópica se define como [36]:

$$J = \sigma E \quad (2.41)$$

donde  $J$  es la densidad de corriente,  $\sigma$  es la conductividad del material y  $E$  es el campo eléctrico.

La ecuación descrita para un superconductor resultará en un valor de conductividad infinita y por ende resistividad cero.

Los superconductores son modelados como materiales con resistividad no lineal, comúnmente de la forma [37]:

$$\rho(J) = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J}{J_c(B)} \right)^{n(B)-1} \quad (2.42)$$

donde  $E_c$  es el campo electromagnético ( $1 \times 10^{-4}$  V/m),  $J_c$  es la densidad de corriente crítica del superconductor,  $n$  es el índice que refleja las características de la microestructura del material superconductor (por lo general es mayor que 20).

**Inductancia:** el cálculo de la inductancia de cintas superconductoras dependerá de la distancia entre las cintas, del ángulo y el sentido del enrollamiento de estas sobre el molde de cobre. De acuerdo con [38] la inductancia para la  $i$ -ésima capa resulta de la siguiente ecuación:

$$L_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \tan^2 \beta_i + 2 \ln \left( \frac{D}{r_i} \right) \right) \quad (2.43)$$

donde  $L_i$  es la autoinductancia de la  $i$ -ésima capa del superconductor,  $\beta_i$  es el ángulo de paso de la  $i$ -ésima capa del superconductor,  $D$  es el radio de la capa del escudo superconductor y  $r_i$  es el radio de la capa superconductora  $i$ .

La inductancia mutua entre las capas  $i$  y  $j$  está dada por:

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\alpha_i \alpha_j r_i}{2 r_j} \tan(\beta_i) \tan(\beta_j) + \ln \left( \frac{D}{r_i} \right) \right) \quad (2.44)$$

donde,  $\alpha_i, \alpha_j$  es el sentido de enrollado de las cintas de la capa  $i$  y capa  $j$ .

La inductancia equivalente de fase a tierra para superconductores triaxiales viene dada por [39]:

$$L_{eq} = \frac{\mu_0}{6\pi} \ln \left( \frac{r_3}{r_1} \right) \quad (2.45)$$

#### 2.4.7.2 Parámetro Paralelo

**Capacitancia:** la capacitancia de un cable superconductor es comparable a la de un cable aislado convencional. En un superconductor es determinada por el grosor de la capa de aislamiento PPLP, la cual viene dada por [38]:

$$C_{ij} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left( \frac{r_j}{r_i} \right)} \quad (2.46)$$

Para el caso de superconductores triaxiales la capacitancia equivalente de fase a tierra es el resultado de la suma de las capacitancias entre las fases [39]:

$$C_{eq} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} + \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right)} + \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left( \frac{r_4}{r_3} \right)} \quad (2.47)$$

#### **2.4.8 Pérdidas en un Cable Superconductor**

La geometría helicoidal del cable superconductor complica el cálculo de pérdidas AC. Estas pérdidas pueden obtenerse de manera aproximada mediante soluciones analíticas ignorando el paso del trenzado en el cable, aunque esta condición resulta que el valor difiera de la situación real del cable. Por lo que la solución analítica puede ser utilizado como una aproximación de las pérdidas AC de un cable superconductor [38].

Los cables superconductores presentan cuatro fuentes principales de pérdidas AC que son [37]:

**Pérdidas por histéresis:** se presentan en la capa superconductora del cable y son causadas por la fuerza de fijación que impide que el flujo magnético entre o salga libremente del material superconductor sometido en un campo magnético AC, provocando que la disipación de calor esté presente por un ciclo completo AC.

**Pérdidas de corrientes de Eddy:** se presenta en la capa del molde de cobre o capa estabilizadora, son causadas por la circulación de corriente en las partes metálicas inducidas por el campo magnético AC.

**Pérdidas ferromagnéticas:** se producen en la capa de substrato, son causadas por los ciclos de histéresis en dicha capa.

**Pérdidas de acoplamiento:** producidas por la circulación de corrientes a través de múltiples capas de cable superconductor.

En sistemas DC las pérdidas son insignificantes si la temperatura a la que se encuentra sometida el superconductor es menor a la temperatura crítica, además en estos sistemas no se presenta pérdidas en el aislamiento dejando únicamente la fuga de calor como fuente de pérdidas [35].

# Capítulo 3

## 3. Metodología

### 3.1 Modelo de Elementos Finitos

Es un método de aproximación de problemas continuos en el que [40]:

- El objeto se divide en un número finito de partes a las que se denominan elementos, el cual su comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a los puntos de unión de cada elemento con el elemento adyacente, estos puntos se denominan nodos.
- La solución del sistema se basa en las reglas de problemas discretos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de esas funciones en los nodos.
- Cada elemento se define a partir del comportamiento de los nodos mediante funciones de interpolación.

Por lo tanto, el método de elementos finitos consiste en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado.

En cuanto a las simulaciones mediante elementos finitos, se encuentran tres tipos de modelos en la literatura [13]:

**Modelos 2D:** son modelos muy simplificados que consideran únicamente una sección transversal del cable. En estos modelos se asume que todos los elementos del cable discurren de forma paralela unos a otros, es decir, sin estar enrollados de forma helicoidal alrededor del eje del cable, como ocurre realmente. De esta manera, solo la componente del vector del campo magnético coplanaria con la sección del cable se toma en cuenta, ignorando la componente paralela a los cables de la armadura. Esta simplificación es una gran fuente de imprecisiones, ya que esta última componente es la principal causante de las corrientes inducidas en la armadura, las

cuales aumentan las pérdidas térmicas en el conjunto del cable. Estas corrientes inducidas dependen claramente de la torsión relativa entre los núcleos y la armadura.

**Modelos 2.5D:** en estos modelos, los cables de la armadura están conectados en serie por un circuito eléctrico externo, acoplado con el modelo de elementos finitos. De esta manera, se incluye el giro entre conductores activos y pasivos en el modelo y se asegura que la corriente total en la armadura es cero.

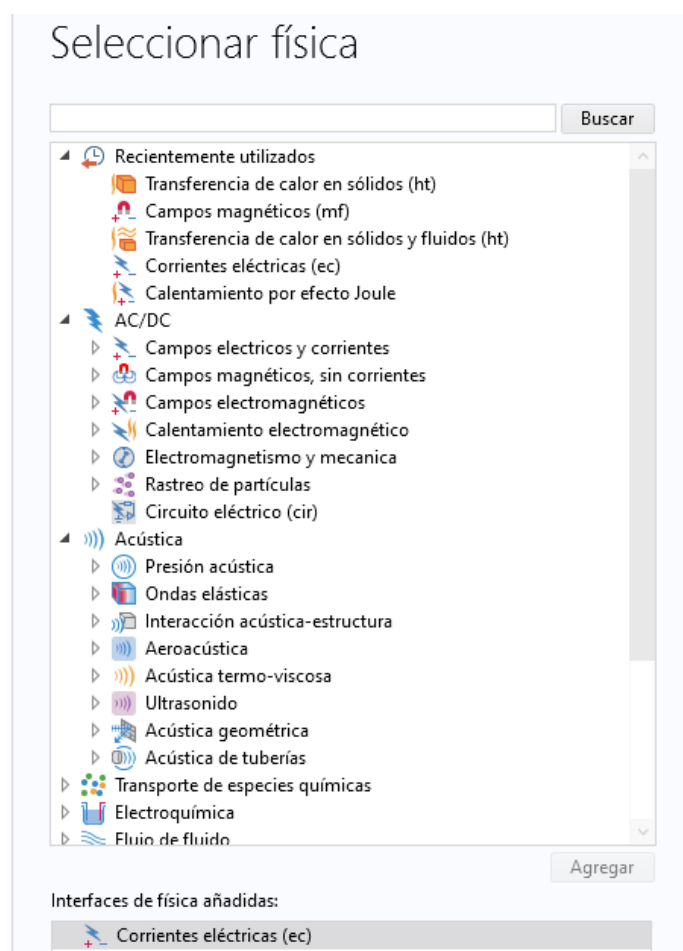
**Modelos 3D:** son utilizados en menor medida debido a alto coste computacional que suponen, en oposición a los modelos 2D. Por el contrario, reproducen con mayor fidelidad los campos electromagnéticos producidos por las trayectorias helicoidales que siguen los conductores activos y pasivos, y aportan información de gran valor acerca de todos los fenómenos que ocurren en el interior de cables de tres núcleos con armadura. Para obtener resultados con la mayor precisión posible, los modelos 3D consideran la menor geometría periódica del cable, es decir, la longitud de cable tal que ambas secciones extremas del mismo son idénticas, presentando todas las fases y todos los cables de la armadura en la misma posición. Esto puede llevar a longitudes de cable demasiado largas para ser malladas y resueltas por códigos FEM, ya que las ratios de giro de las fases y de la armadura son diferentes y en sentidos opuestos, para conseguir estabilidad torsional.

Sin embargo, los autores de la referencia [41] proponen una nueva metodología según la cual, atendiendo a la simetría axial que presentan las pérdidas en el cable, es posible reducir la geometría del modelo de una manera muy significativa, manteniendo los umbrales de error por debajo del 5%.

### 3.2 Software Comsol Multiphysics

Es un software de análisis y resolución de problemas basados en el método de elementos finitos con el que se pueden obtener soluciones para varias aplicaciones físicas, en especial para fenómenos acoplados o multi físicos [42].

Cuenta con varios módulos de aplicación y cada módulo cuenta con sus físicas propias, las mismas que dependiendo del estudio que se realice se pueden acoplar o enlazar.



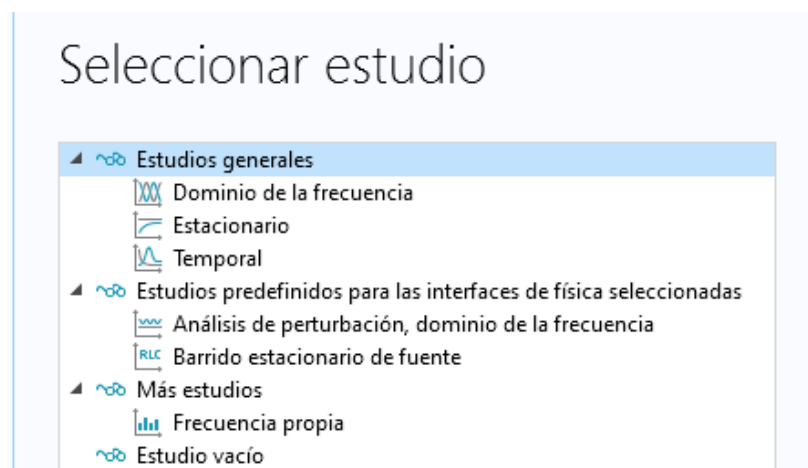
**Figura 3.1** Ventana de físicas de Comsol Multiphysics



<p>AC/DC</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Campos eléctricos y corrientes.</li> <li>• Campos magnéticos sin corrientes.</li> <li>• Campos electromagnéticos.</li> <li>• Electromagnetismo y mecánica.</li> <li>• Rastreo de partículas.</li> <li>• Circuito eléctrico.</li> </ul>	<p>Acústica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión acústica.</li> <li>• Ondas elásticas.</li> <li>• Interacción acústica-estructura.</li> <li>• Aero acústica.</li> <li>• Acústica termo-viscosa.</li> <li>• Ultrasonido.</li> <li>• Acústica geométrica.</li> <li>• Acústica de tuberías.</li> </ul>	<p>Transferencia de calor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia de calor en sólidos.</li> <li>• Transferencia de calor en fluidos.</li> <li>• Transferencia de calor en sólidos y fluidos.</li> <li>• Transferencia de calor conjugados.</li> <li>• Radiación.</li> <li>• Calentamiento electromagnético.</li> <li>• Transferencia de calor en tuberías.</li> </ul>	<p>Electroquímica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribución de corriente primaria y secundaria.</li> <li>• Distribución de corriente terciaria.</li> <li>• Electroanálisis.</li> <li>• Electrodo.</li> <li>• Corrosión.</li> <li>• Electrodeposición.</li> </ul>	<p>Flujo de fluido.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flijo monofásico.</li> <li>• Flujo multifásico.</li> <li>• Flujos en medios porosos.</li> <li>• Flujo no isotérmico.</li> <li>• Flujo con número Mach alto.</li> <li>• Rastreo de partículas.</li> <li>• Flujo enrarecido.</li> </ul>
<p>Óptica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Óptica de rayos.</li> <li>• Óptica de ondas.</li> </ul>	<p>Plasma</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plasma.</li> <li>• Plasma, periodico de tiempo.</li> <li>• Plasma acoplada inductivamente.</li> <li>• Plasma microondas.</li> <li>• Descarga de corona.</li> <li>• Descargas de equilibrio.</li> <li>• Transporte de especies.</li> </ul>	<p>Radiofrecuencia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Líneas de transmisión.</li> <li>• Ondas electromagnéticas, dispersión asintótica.</li> <li>• Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia.</li> <li>• Ondas electromagnéticas, tiempo explícito.</li> <li>• Ondas electromagnéticas transitorio</li> </ul>	<p>Semiconductor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semiconductor.</li> <li>• Ecuación de Schrodinger.</li> <li>• Ecuación de Schrodinger-Poisson.</li> </ul>	

**Figura 3.2** Principales físicas en Comsol Multiphysics

Dependiendo del análisis que se requiera, el programa Comsol Multiphysics presenta varios tipos de estudios como se muestran a continuación:



**Figura 3.3** Ventana de Estudios de Comsol Multiphysics

**Dominio de frecuencia:** se lo utiliza para calcular la respuesta de un modelo lineal o un modelo linealizado sujeto a la excitación armónica de una o varias frecuencias.

**Estacionario:** es utilizado cuando las variables de campo no varían en función del tiempo, por ejemplo, para calcular la corriente estática, campos magnéticos o corrientes DC.

**Temporal:** a diferencia del estudio estacionario, el estudio temporal se lo utiliza cuando las variables de campo varían en función del tiempo, como por ejemplo cuando se desea calcular transientes electromagnéticos, cambios de temperatura en el tiempo.

**Análisis de perturbación (dominio de la frecuencia):** se utiliza para estudiar pequeñas oscilaciones en soluciones sesgadas en electromagnetismo, que consiste en dos pasos: un estudio estacionario en el que se calcula la solución sesgada, seguida de un estudio de perturbación en el dominio de la frecuencia para calcular la respuesta de frecuencia sobre la solución sesgada.

**Barrido estacionario de fuente:** resuelve un estudio estacionario barriendo los datos de entrada, extrayendo matrices concentradas automáticamente como, por ejemplo: una matriz de capacitancia en electrostática o una matriz de resistencia en corrientes eléctricas.

**Frecuencia propia:** es usado para calcular los modos propios (eigenmodes) y frecuencias propias (eigenfrecuencias) de un modelo lineal o modelo linealizado. Por ejemplo; en electromagnetismo las frecuencias propias corresponden a las frecuencias de resonancia y los modos propios corresponde al campo electromagnético normalizado a las frecuencias propias.

### **3.3 Solución del Método de Elementos finitos en Comsol Multiphysics**

En la presente sección se muestra el principio básico que el MEF implementa con la finalidad de solucionar las ecuaciones de campo electromagnético por medio del programa Comsol Multiphysics.

Inicia con el planteamiento de ecuaciones de campo magnético de estado cuasi-estacionario en el dominio de la frecuencia y electrostático, al aplicar la teoría de los potenciales por los métodos de carga, energía e impedancia compleja se obtienen los parámetros correspondientes a la impedancia serie y admitancia paralela [43].

La teoría de los potenciales es un instrumento matemático que permite disminuir la complejidad de un problema de ecuaciones diferenciales por medio de diferenciación para obtener una solución al problema original.

Para determinar los parámetros eléctricos se debe de tomar en cuenta las siguientes consideraciones con la finalidad de reducir la complejidad del problema [43]

- Los cables están conformados por conductores de longitud infinita, área transversal uniforme, paralelos al suelo y entre sí, despreciando los efectos que se presentan en el extremo inicial y al final del cable.
- El sistema es lineal, isotrópico y homogéneo, esto es, la permeabilidad relativa, permitividad relativa y conductividad son constantes en el dominio de la solución.
- No existen corrientes de desplazamiento en los elementos no conductores.
- Se consideran cargas superficiales en el suelo y cable.

### 3.3.1 Cálculo de Impedancia mediante Método de Elemento Finitos

Las ecuaciones de Ampere-Maxwell y de continuidad de corriente, junto con las definiciones de potencial eléctrico escalar y potencial magnético vectorial, son las ecuaciones que logran definir un campo cuasi-estacionario magnético en el dominio de la frecuencia [43]. Estas ecuaciones son las que el programa Comsol Multiphysics resuelve por medio de las físicas de campos eléctricos y magnéticos [43].

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.2)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J_{ext} \quad (3.3)$$

$$E = -\nabla V - j\omega A \quad (3.4)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.4, la expresión  $-\nabla V - j\omega A$  representa a las componentes del campo eléctrico que se genera debido al gradiente del potencial eléctrico y la componente del campo inducido respectivamente.

Reemplazando 3.4 en 3.3, se obtienen las componentes de la corriente.

$$J = -\sigma \nabla V - j\omega A + j\omega D + J_{ext} = J_s + J_e + J_d + J_{ext} \quad (3.6)$$

La corriente que circula por el conductor resulta de integrar 3.6 a lo largo del área transversal del conductor.

$$I = \oint J \cdot ds \quad (3.7)$$

Al sustituir 3.5 en 3.2 y haciendo uso de la identidad vectorial de doble derivación  $\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ , se obtiene:

$$J = \frac{1}{\mu} \nabla(\nabla \cdot A) - \frac{1}{\mu} \nabla^2 A \quad (3.8)$$

Sustituyendo 3.6 en 3.8 y considerando que  $J_d = 0$  y  $J_{ext} = 0$ .

$$-\sigma \nabla V - j\omega A = \frac{1}{\mu} \nabla(\nabla \cdot A) - \frac{1}{\mu} \nabla^2 A \quad (3.9)$$

Considerando  $\nabla \cdot A = -\sigma \nabla V$ . Reemplazando 3.3 en 3.8 resulta en la ecuación de difusión en 2D, con  $J_d = 0$

$$\nabla^2 A + j\mu\sigma A = 0 \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 es resuelta por medio de MEF y de dicha solución es posible calcular  $Z(w)$ .

### 3.3.1.1 Método de la Impedancia Compleja

Partiendo de la impedancia compleja se pueden obtener la resistencia e inductancia para ello se debe de considerar la componente de corriente  $J_s$  como [43]:

$$J_s = -\sigma \nabla V = -\sigma \frac{dV}{dz} a_z \quad (3.11)$$

La caída de potencial en dirección del eje z en el dominio de la frecuencia se expresa como:

$$-\frac{dV}{dz} = Z(w)I \quad (3.12)$$

Despejando  $Z(w)$  de 3.12.

$$Z(w) = -\frac{1}{I} \frac{dV}{dz} \quad (3.13)$$

De 3.11 se despeja el término  $\frac{dV}{dz}$  que corresponde al diferencial de tensión y se sustituye en 3.12 se obtiene:

$$Z(w) = \frac{\|J_s\|}{I\sigma} \quad (3.14)$$

donde  $I$  se define en 3.7.

De 3.14 se puede obtener las pérdidas resistivas por efecto Joule y la inductancia total [43].

$$R(w) = \text{real}(Z(w)) \quad (3.15)$$

$$L(w) = \frac{\text{imag}(Z(w))}{w} \quad (3.16)$$

Estas últimas ecuaciones corresponden al caso de un conductor monofásico, es decir, son los parámetros que se obtienen al excitar un conductor respecto al suelo o a otro conductor [43]. La generalización para el caso de  $n$  conductores se muestra a continuación.

$$Z_{ij} = \frac{V_i}{I_j} = \frac{J S_i}{I_j \sigma_j} ; (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.17)$$

Este método presenta la principal desventaja de que no permite determinar las resistencias e inductancias en los elementos del cable (núcleo, armadura, capas de aislamiento, etc) ya que estos parámetros están inmersos en la impedancia serie.

Una ventaja es que este método no requiere de las distribuciones de campo para el cálculo de  $Z(w)$ .

### 3.3.1.2 Método de la Energía

Este método a diferencia del método de la impedancia compleja requiere la distribución de campo magnético producto de la corriente total.

Para determinar los parámetros serie es necesario conocer las pérdidas por efecto Joule, así como la energía magnética almacenada [43].

Las pérdidas por efecto Joule se calculan de

$$P = \int \frac{J^2 \cdot dv}{\sigma} \quad (3.18)$$

Utilizando la ley de Ohm en 3.18 se tiene:

$$R(w) = \frac{\int \frac{J^2 \cdot dv}{\sigma}}{\|I\|^2} \quad (3.19)$$

La energía magnética viene dada por:

$$W_m = \frac{1}{2} \int B \cdot H \, dv \quad (3.20)$$

De las consideraciones iniciales donde se supone que el medio es lineal, isotrópico y homogéneo, resulta:

$$W_m = \frac{1}{2} \mu \int H^2 dv \quad (3.21)$$

La energía almacenada en un conductor en función de la inductancia viene dada por:

$$W_m = \frac{1}{2} L \|I\|^2 \quad (3.22)$$

Cuando existen varios conductores en el medio produce acoplamientos mutuos, estos acoplamientos se definen como:

$$W_{m_{ij}} = \frac{1}{2} L_i \|I_i\|^2 + \frac{1}{2} L_j \|I_j\|^2 + M_{ij} \|I_i\| \|I_j\| \quad (3.23)$$

Despejando  $L(w)$  y  $M_{ij}$  de 3.22 y 3.23 se pueden obtener las inductancias propias y mutuas.

$$L(w) = \frac{2W_m}{\|I\|^2} \quad (3.24)$$

La inductancia mutua es resultado del cálculo previo de la inductancia propia de los conductores. La inductancia mutua viene dada por:

$$M_{ij} = \frac{W_{m_{ij}} - \frac{1}{2} L_i \|I_i\|^2 - \frac{1}{2} L_j \|I_j\|^2}{\|I_i\| \|I_j\|} \quad (3.25)$$

### 3.3.2 Cálculo de la Admitancia con el Método de Elementos Finitos

A partir del estudio del campo electrostático se calculan los elementos de la matriz admitancia [43].

Las ecuaciones de Maxwell que definen el campo electrostático son:

$$\nabla \times E = 0 \quad (3.26)$$

$$\nabla \times \epsilon E = \rho \quad (3.27)$$

Se considera que:

$$E = -\nabla V \quad (3.28)$$

Sustituyendo 3.28 en 3.27.

$$\nabla \cdot \varepsilon(-\nabla V) = 0 \quad (3.29)$$

Se obtiene la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.30)$$

### 3.3.2.1 Método de la carga

La capacitancia en un conductor viene dada por:

$$C = \frac{|q|}{|V|} \quad (3.31)$$

Donde  $q$  resulta de la integración de  $D$  a lo largo de la superficie del conductor.

$$q = \oint D \, ds \quad (3.32)$$

La diferencia de potencia se define como:

$$V = - \int E \, dl \quad (3.33)$$

Para hacer uso de este método en el cálculo de la capacitancia se asume como conocida la diferencia de potencial entre los conductores [43].

$$q = \oint D \, ds \quad (3.34)$$

En la capacitancia propia la carga es calculada en la superficie del conductor excitado, la cual debe ser igual y de signo contrario a la carga calculada en los otros conductores [43].

El cálculo de la capacitancia mutua es similar al caso anterior.

### 3.3.2.2 Método de la Energía

La capacitancia se obtiene a partir de la energía almacenada en el material dieléctrico.

$$W_e = \frac{1}{2} \int D \cdot E \, dv \quad (3.35)$$

Se parte de las premisas antes mencionadas, de que el medio es lineal, isotrópico y homogéneo, la energía almacenada resulta:



$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon \int E^2 dv \quad (3.36)$$

La energía almacenada en un par de conductores en función de la capacitancia está dada por:

$$W_e = \frac{1}{2} C V^2 \quad (3.37)$$

Despejando C en 3.37 se obtiene la capacitancia propia:

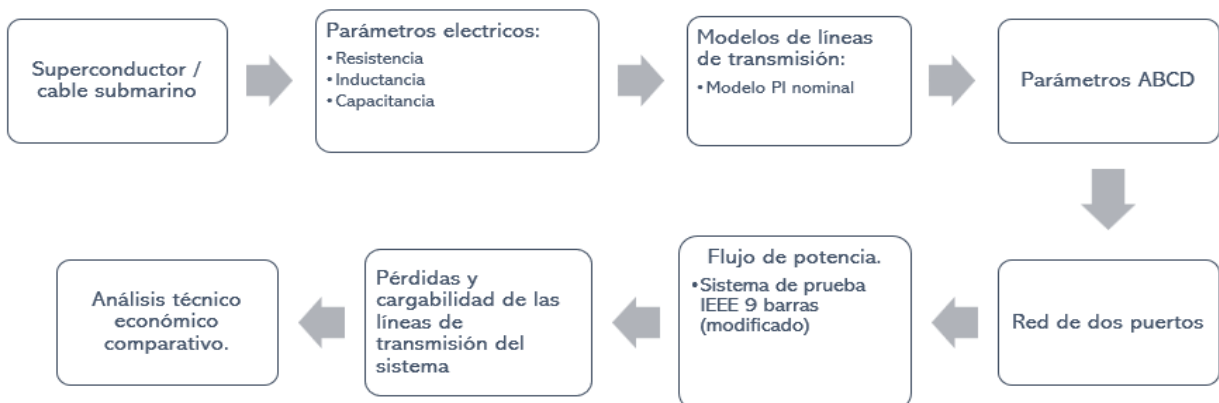
$$C = \frac{2|W_e|}{|V|^2} \quad (3.38)$$

Para el cálculo de la capacitancia mutua se debe de calcular en primer lugar la capacitancia propia.

$$C_{ij} = \frac{W_{e_{ij}} - \frac{1}{2} (C_{ij}V_i^2 + C_jV_j^2)}{V_iV_j} \quad (3.39)$$

### 3.4 Modelación de Cable Submarino y Superconductor

Con la finalidad de modelar y representar el cable submarino convencional y el cable superconductor, es indispensable aplicar una herramienta la cual base su resolución en elementos finitos, por lo cual para el presente caso aplicará Comsol Multiphysics, la que permitirá modelar los cables mencionados y determinar los parámetros eléctricos, como resistencia, inductancia y capacitancia, siguiendo el flujo de actividades mostrado en la figura 3.4 para obtener el modelo deseado.



**Figura 3.4** Flujo de trabajo para simulación y obtención de resultados

### 3.4.1 Consideraciones de Diseño del Cable Submarino

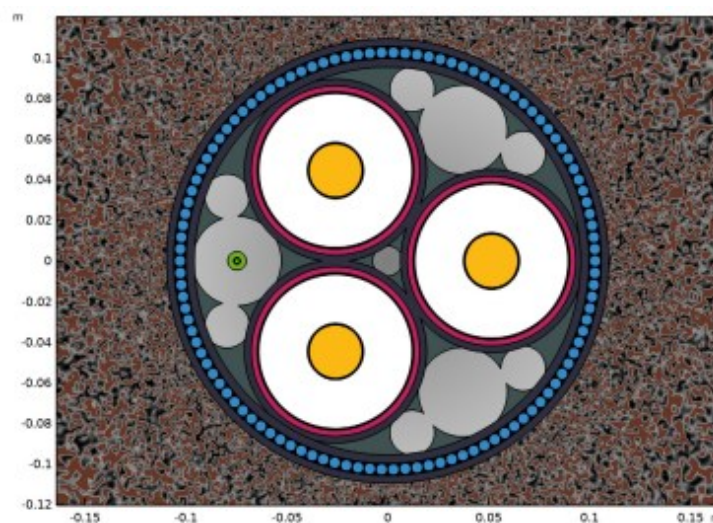
El diseño del cable submarino ordinario se basará en el modelo de cable submarino que hace referencia en el manual del programa Comsol Multiphysics [42].

Como se muestra en la figura 3.5 el cable tripolar submarino estará conformado por los siguientes componentes:

- Tres conductores de cobre distribuidos equilateralmente en un triángulo (color amarillo).
- Cubierta de polietileno reticulado XLPE (color blanco).
- Capa de compuesto semiconductor (color rojo).
- Pantalla de plomo (color negro).
- Ductos de polipropileno (color gris).
- Armadura de acero galvanizado (color celeste).
- Cubierta de polietileno (color azul oscuro).
- Cable de fibra óptica (color verde).

El cable tendrá una longitud de 10 km, enterrado en el suelo marino.

El voltaje aplicado es de 138 kV línea-línea.



**Figura 3.5** Sección transversal del cable submarino [42]

### 3.4.2 Simulación Multifísica del Cable Submarino Convencional

En la presente sección se definirán los pasos a seguir para la simulación del cable submarino convencional en el programa Comsol Multiphysics.

#### 3.4.2.1 Selección de Físicas

Para poder calcular los parámetros eléctricos de un cable se requieren las siguientes físicas:

Capacitancia: Corrientes eléctricas [AC/DC > Corrientes y campos eléctricos > Corrientes eléctricas].

Resistencia-Inductancia: Campos magnéticos [AC/DC > Campos electromagnéticos > Campos magnéticos].

#### 3.4.2.2 Selección de Estudios

Resistencia-Inductancia-Capacitancia: Dominio de frecuencia [Estudio general > Dominio de frecuencia].

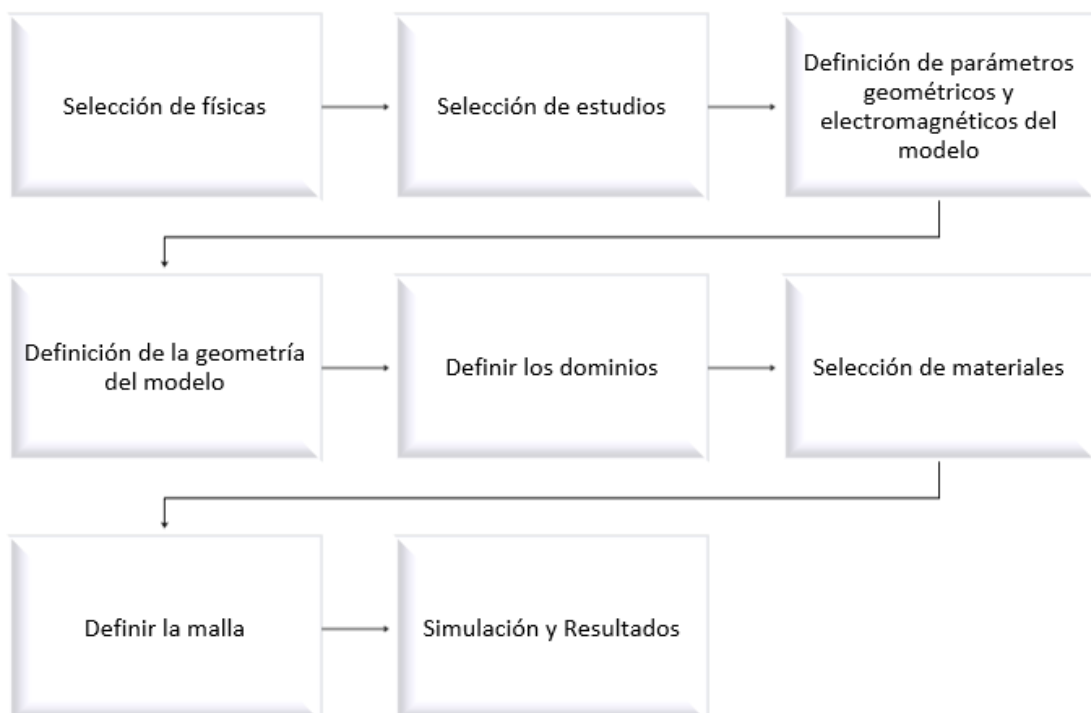


Figura 3.6 Flujo de trabajo para simulación en Comsol Multiphysics

### 3.4.2.3 Parámetros Geométricos y Electromagnéticos

Los parámetros geométricos están en los manuales del programa Comsol Multiphysics [44] y la guía de cables submarinos de ABB [45].

En la barra de inicio, dar click en Parámetros y seleccionar Agregar Parámetros.

Se deben de crear tres nuevos parámetros:

- Parámetros Geométricos 1.
- Parámetros Geométricos 2.
- Parámetros Electromagnéticos.

Los parámetros geométricos 1 corresponden a las dimensiones de las capas que componen al cable y se deben de ingresar los valores mostrados en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Parámetros Geométricos 1

Abreviatura	Valor	Unidad	Descripción
Dcon	26,2	[mm]	Diámetro de los conductores principales (fase)
Tins	24,0	[mm]	Espesor de aislamiento (XLPE)
Dins	77,6	[mm]	Diámetro sobre aislamiento (XLPE y SCC)
Tscc	$(Dins / 2 - Dcon / 2 - Tins) / 2$	[mm]	Espesor del compuesto semiconductor
Tpbs	2,9	[mm]	Espesor de la vaina de plomo
Tpe	2,9	[mm]	Espesor revestimiento de polietileno
Dpha	$Dins + 2 * Tpbs + 2 * Tpe$	[mm]	Diámetro sobre fase (incluyendo vaina y PE)
Dpha3	$Dpha * (2 / \sqrt{3} + 1)$	[mm]	Diámetro en tres fases combinadas
Dfic	2,5	[mm]	Diámetro del núcleo de fibra óptica
Tfih	0,5	[mm]	Espesor de la hélice de acero (fibra)
Dfib	9,2	[mm]	Diámetro sobre cable de fibra óptica
Dcab	219,0	[mm]	Diámetro exterior del cable submarino
Darm	$(Dcab + Dpha3) / 2$	[mm]	Diámetro central del anillo de armadura
Tarm	5,6	[mm]	Espesor de la armadura (diámetro del alambre)
Narm	110		Número de alambres de armadura en anillo
Mfil	0,5	[mm]	Margen de relleno
Marm	$\pi * Darm / Narm - Tarm$	[mm]	Margen de armadura

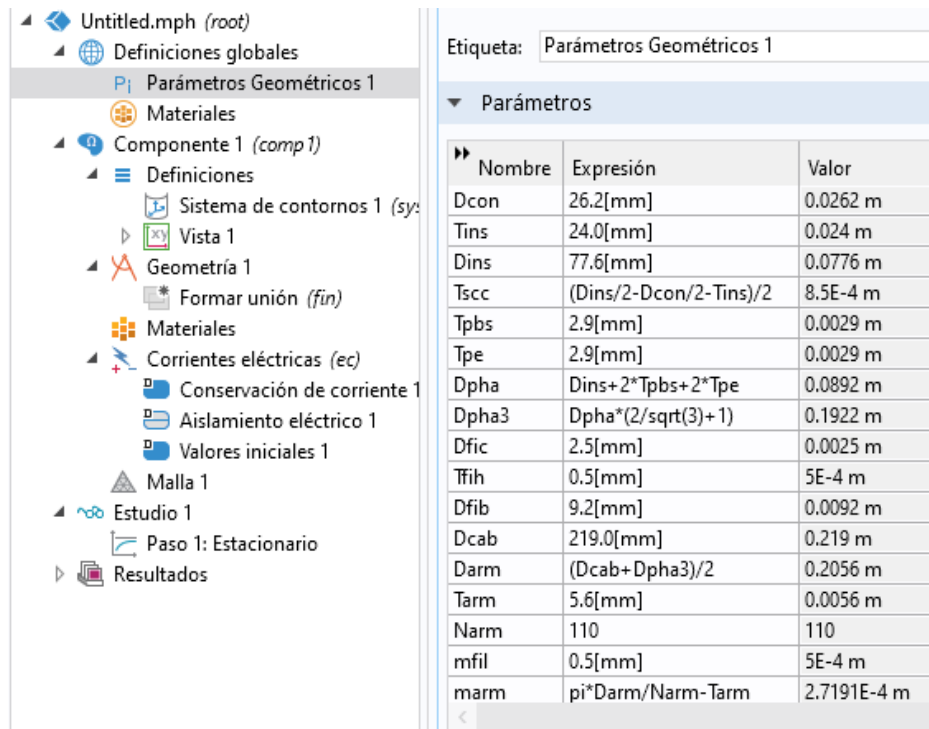


Figura 3.7 Parámetros Geométricos ingresados en Comsol Multiphysics

Los parámetros geométricos 2 corresponden a la definición de las superficies del cable y se deben de ingresar los valores mostrados en la tabla 3.2.

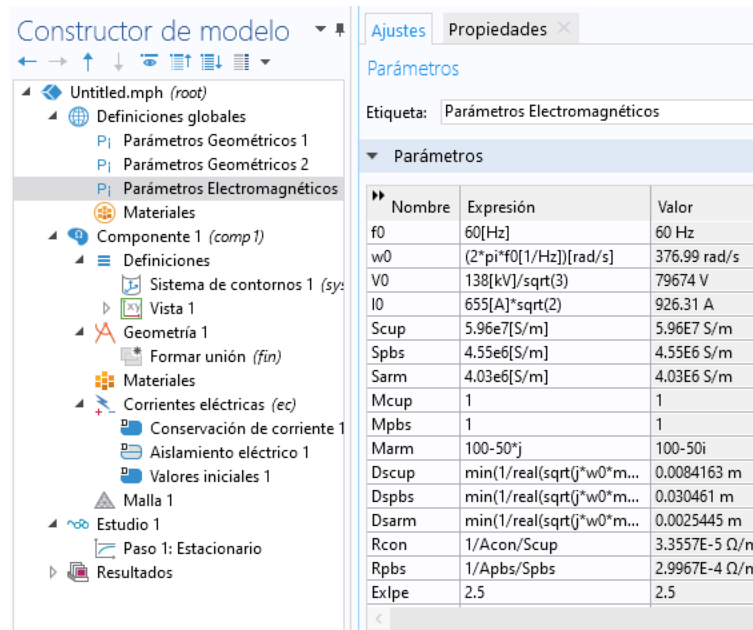
Tabla 3.2 Parámetros Geométricos 2

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Acon	500[mm^2]	5E-4 m <sup>2</sup>	Área de la sección transversal de los conductores principales (por fase)
Ncon	$Acon / (\pi * (Dcon/2)^2)$	0.92742	Densidad de empaquetamiento del conductor (fase)
Apbs	$\pi * (Dins + Tpbs) * Tpbs$	7.334E-4 m <sup>2</sup>	Área de sección transversal de la vaina de plomo (por fase)
Lsec1	1/3	0.33333	Sección de unión cruzada de longitud relativa 1
Lsec2	1-Lsec1-Lsec3	0.33333	Sección 2 de unión cruzada de longitud relativa
Lsec3	1/3	0.33333	Sección de unión cruzada de longitud relativa 3
Lcab	100[km]	100000 m	Longitud total del cable submarino
Scab	1e5	1E5	Factor de escala geométrico (modelo 2Daxi)

Los parámetros electromagnéticos que se deben de ingresar se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Parámetros Electromagnéticos

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
f0	60[Hz]	60 Hz	Frecuencia de operación
w0	$(2 \cdot \pi \cdot f0 [1/Hz])$ [rad/s]	376.99 rad/s	Frecuencia angular
V0	138[kV]/sqrt(3)	79674 V	Voltaje de fase a tierra (amplitud)
I0	655[A]*sqrt(2)	926.31 A	Corriente nominal (amplitud)
Scup	5.96e7[S/m]	5.96E7 S/m	Conductividad de cobre, a 20 ° C
Spbs	4.55e6[S/m]	4.55E6 S/m	Conductividad de la vaina de plomo, a 20 ° C
Sarm	4.03e6[S/m]	4.03E6 S/m	Conductividad del alambre de armadura, a 20 ° C
Mcup	1	1	Permeabilidad relativa, cobre
Mpbs	1	1	Permeabilidad relativa, vaina de plomo
Marm	100-50*j	100-50i	Permeabilidad relativa, alambres de armadura
Dscup	$\min(1/\text{real}(\sqrt{j \cdot w0 \cdot \mu0\_c \text{ onst} \cdot \text{Mcup} \cdot \text{Scup}})), D\text{con}/3)$	0.0084163 m	Profundidad de la piel, cobre (analítica)
Dspbs	$\min(1/\text{real}(\sqrt{j \cdot w0 \cdot \mu0\_c \text{ onst} \cdot \text{Mpbs} \cdot \text{Spbs}})), 12 \cdot \text{Tpbs})$	0.030461 m	Profundidad de la piel, vaina de plomo (analítica)
Dsarm	$\min(1/\text{real}(\sqrt{j \cdot w0 \cdot \mu0\_c \text{ onst} \cdot \text{Marm} \cdot \text{Sarm}})), \text{Tarm}/2)$	0.0025445 m	Profundidad de la piel, alambres de armadura (analítica)
Rcon	1/Acon/Scup	3.3557E-5 $\Omega$ /m	Resistencia CC del conductor principal por fase, a 20 ° C (analítica)
Rpbs	1/Apbs/Spbs	2.9967E-4 $\Omega$ /m	Resistencia DC de la vaina de plomo por fase, a 20 ° C (analítica)
Exlpe	2.5	2.5	Permitividad relativa XLPE (IEC 60287)

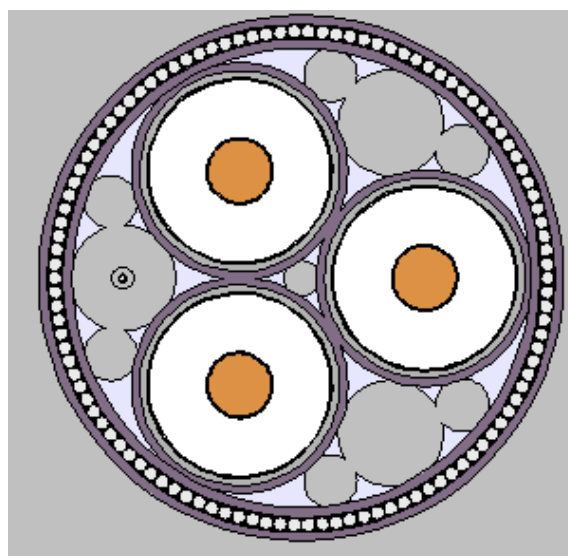


**Figura 3.8** Parámetros electromagnéticos ingresados en Comsol Multiphysics

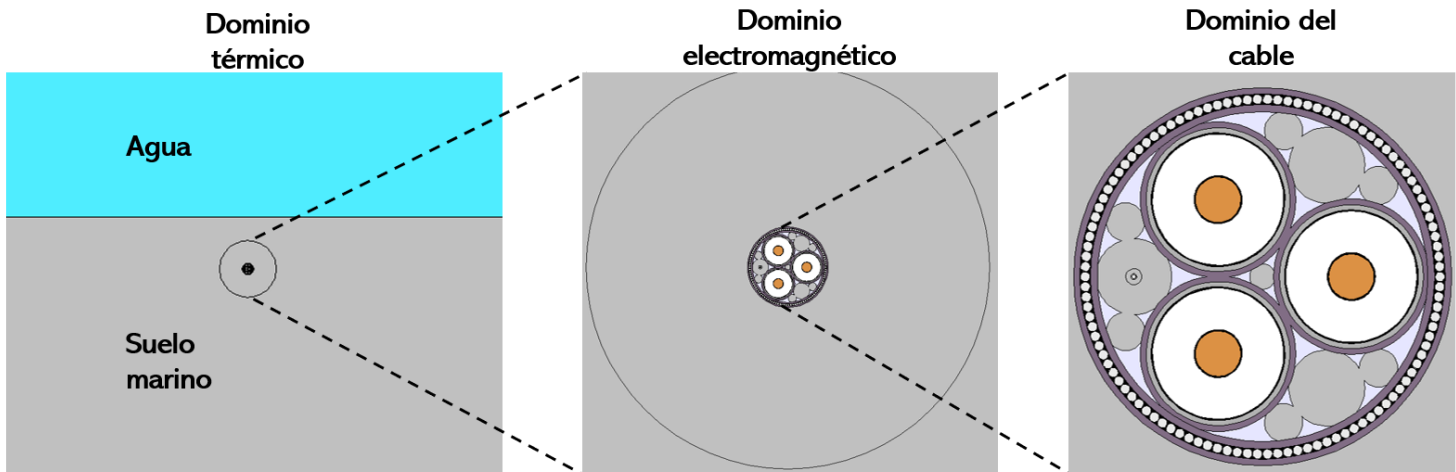
#### 3.4.2.4 Definición de la Geometría del Modelo

Comsol Multiphysics es un programa con una interfaz gráfica que permite crear las geometrías del modelo a ser estudiado o bien importar el modelo desde otro programa de modelado como puede ser Autocad, Solidworks, Revit, PTC Pro Engineer, entre otros.

En este caso y siguiendo los pasos detallados en [41] se construye la geometría del modelo de cable submarino.



**Figura 3.9** Modelo de cable submarino



**Figura 3.10** Representación de Dominios en el modelo

### 3.4.2.5 Definición de Dominios

Un dominio es un conjunto de geometrías que sirven para definir de una manera sencilla a que elementos del modelo se le aplica una física determinada.

En la figura 3.10 se puede apreciar los dominios establecidos para la simulación.

Se definen tres dominios:

- Dominio del cable que comprende todos los elementos del cable como tal.
- Dominio electromagnético, que comprende una circunferencia de radio 5 veces mayor que el radio del cable.
- Dominio térmico, que comprende el suelo marino, agua y el cable como tal.

### 3.4.2.6 Selección de Materiales

En la sección 3.3.1 se mostró la composición del cable submarino, en base a ello se definen los materiales y propiedades eléctricas, magnéticas y térmicas de cada uno de ellos.

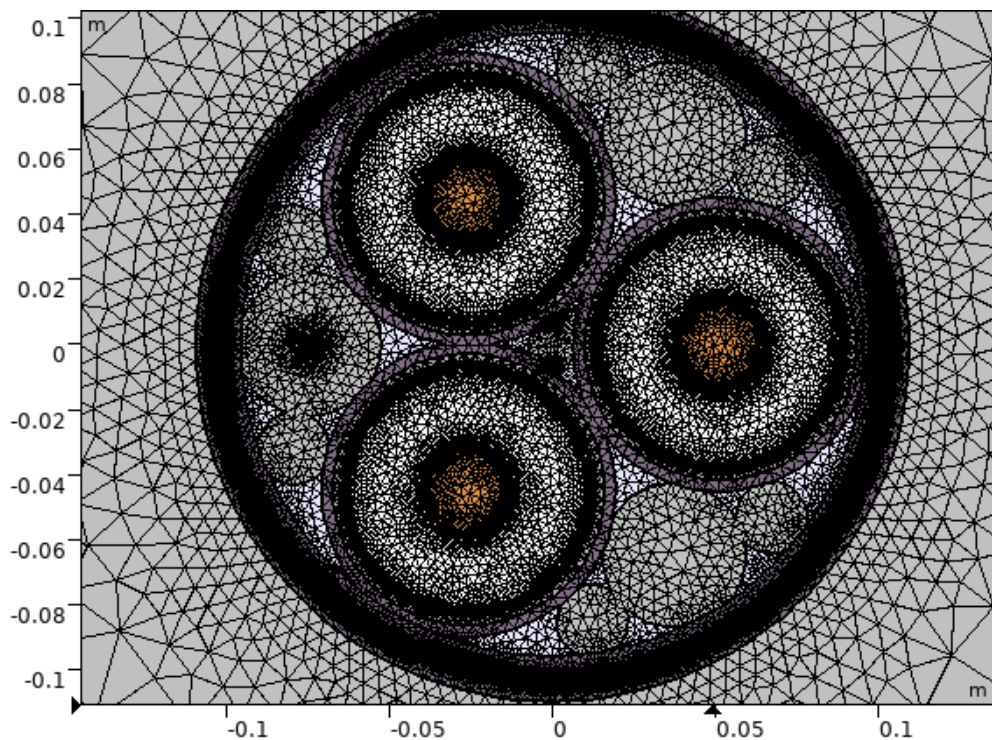


»»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grup
	Permeabilidad relativa	mur_i...	1	1	Básic
	Conductividad eléctrica	sigma...	1.46e6[S/m]	S/m	Básic
	Permitividad relativa	epsilo...	1	1	Básic
	Conductividad térmica	k_iso ;...	17.5[W/(m*...]	W/(m*...]	Básic
	Densidad	rho	7920[kg/m...]	kg/m <sup>3</sup>	Básic
	Capacidad calorífica con presi...	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Básic

**Figura 3.11** Definición de propiedades del material

### 3.4.2.7 Definición de la Malla

La malla por usar en la simulación es la “Normal”, debido a que al hacer la malla más fina esto resulta en un mayor consumo de recursos computacionales y de acuerdo a lo indicado en [12] los resultados obtenidos con una malla más fina no varían significativamente en comparación con el mallado normal.



**Figura 3.12** Mallado normal del modelo

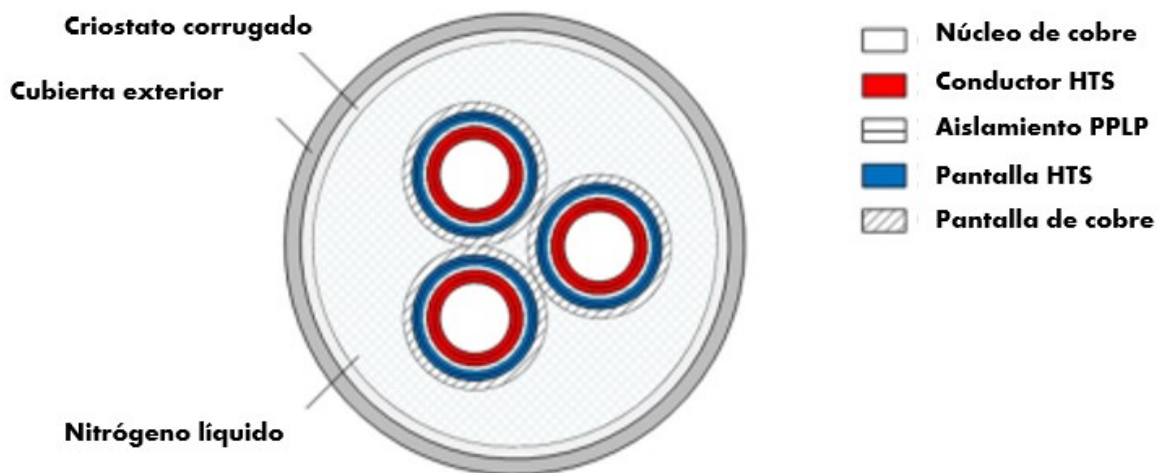
### 3.4.3 Consideraciones de Diseño del Cable Superconductor

Para el diseño del cable superconductor del presente trabajo se basó en el modelo de cable superconductor propuesto en [37].

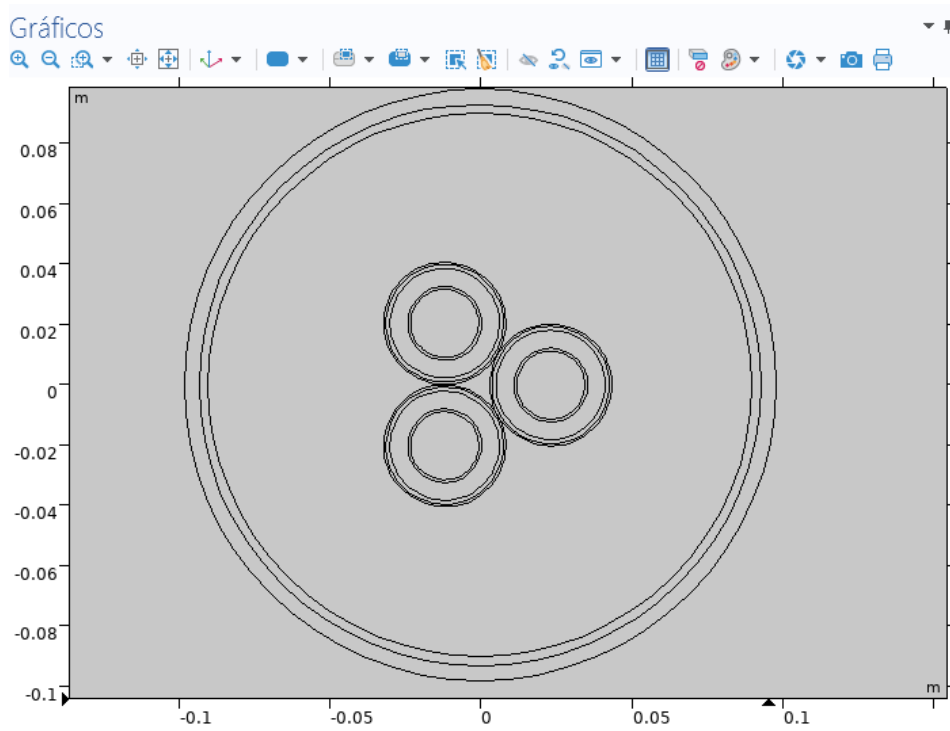
El modelo de cable superconductor cuenta con los siguientes parámetros geométricos.

**Tabla 3.4** Parámetros geométricos de cable superconductor

Abreviatura	Valor (diámetro)	Unidad	Descripción
Dcon	22.2	[mm]	Diámetro del núcleo de cobre
HTScapa	24.4	[mm]	2 capas de cintas superconductoras YBCO
Tcapa	36.2	[mm]	Capa de aislamiento de papel laminado de polipropileno
Scapa	38.9	[mm]	Pantalla formada por 2 capas de cintas superconductoras YBCO
Scobre	40.4	[mm]	Pantalla de cinta de cobre
NLi			Nitrógeno líquido
Ccry	180	[mm]	Tubo doble de acero inoxidable corrugado con aislamiento al vacío
Carm	186	[mm]	Capa de polietileno



**Figura 3.13** Sección transversal de conductor HTS tripolar [37]



**Figura 3.14** Modelo de cable superconductor en programa Comsol Multiphysics

# Capítulo 4

## 4. Resultados y Análisis

El programa Comsol Multiphysics se lo utilizó para calcular los parámetros eléctricos de los cables en estudio como son la resistencia, inductancia y capacitancia, como se muestra en las siguientes secciones.

### 4.1 Simulaciones y Resultados del Cable Convencional

#### 4.1.1 Capacitancia

Para que el programa Comsol Multiphysics realice el cálculo de la capacitancia del cable se deben de realizar los siguientes pasos:

- Definir la tierra del modelo: esta corresponderá al dominio electromagnético del modelo, debido a que se asume que el suelo marino se encuentra aterrado, es decir potencial cero.
- Definir las fases del cable y sus valores iniciales de voltaje.
- Una vez realizado los pasos antes descritos se procede al cálculo de la capacitancia del cable.

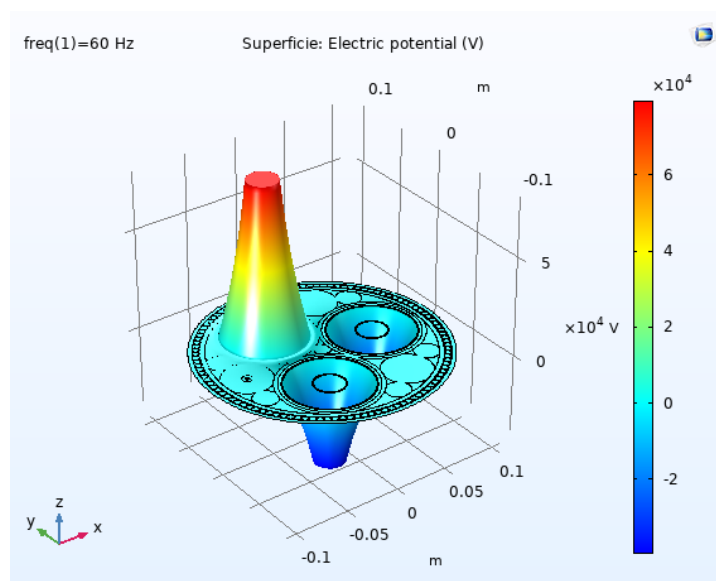
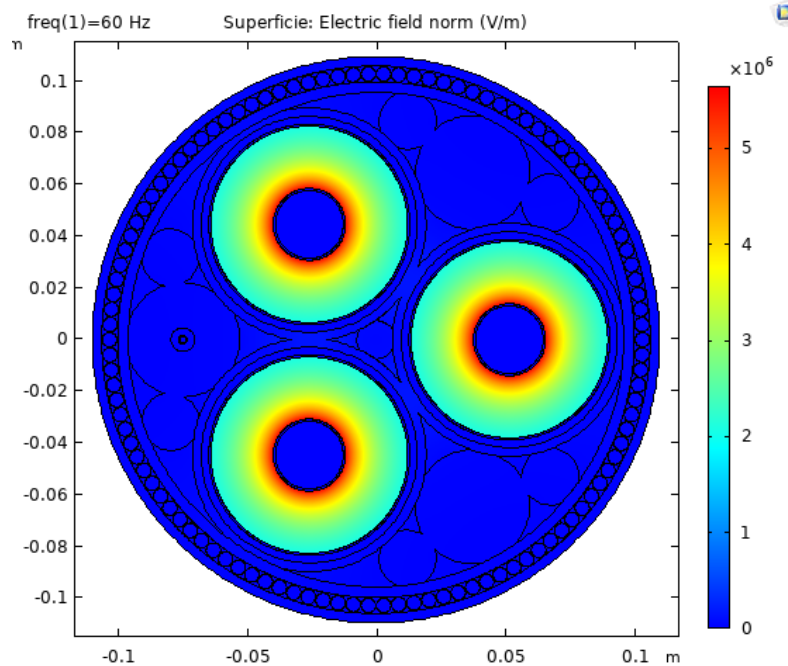


Figura 4.1 Potencial eléctrico en cable submarino



**Figura 4.2** Campo eléctrico en cable submarino

**Tabla 4.1** Capacitancia del cable submarino

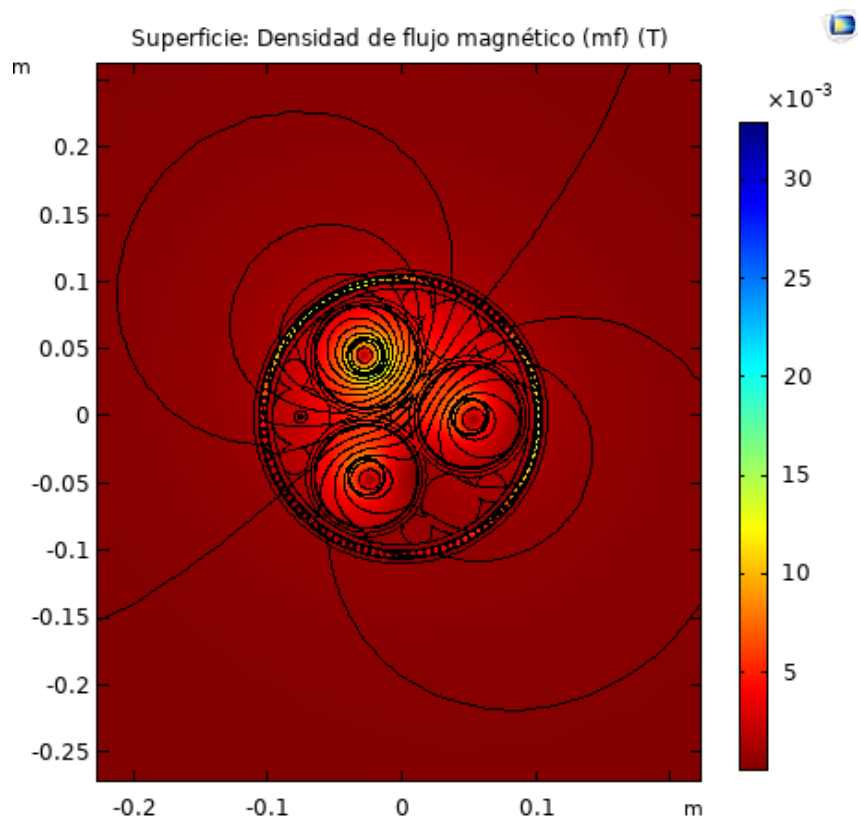
Frecuencia [Hz]	Capacitancia de la fase 1 [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ]	Capacitancia de la fase 2 [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ]	Capacitancia de la fase 3 [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ]
60.000	0.13834	0.13834	0.13834

#### **4.1.2 Resistencia e Inductancia**

Para el cálculo de la resistencia e inductancia del cable se utiliza la física de campos magnéticos.

Se inicia aplicando corriente eléctrica a las fases del cable y definiendo los valores iniciales de la misma.

Una vez realizado lo anterior, el programa calcula la resistencia e inductancia del cable.



**Figura 4.3** Densidad de flujo magnético en cable submarino

**Tabla 4.2** Resistencia e inductancia del cable submarino

Resistencia (mΩ/km)	Inductancia (mH/km)	Reactancia inductiva ((mΩ/km)
52.508	0.41909	157.993

Además, se presentan las pérdidas en las fases, pantalla y armadura del cable.

**Tabla 4.3** Pérdidas eléctricas en los elementos

Pérdidas de fases (W/km)	Pérdidas de pantalla (W/km)	Pérdidas de armadura (W/km)
47,043	12,946	7,589

## 4.2 Simulaciones y Resultados del Cable Superconductor

El cálculo de los parámetros eléctricos del cable superconductor se realizará siguiendo los pasos descritos en la sección anterior.

## 4.2.1 Capacitancia

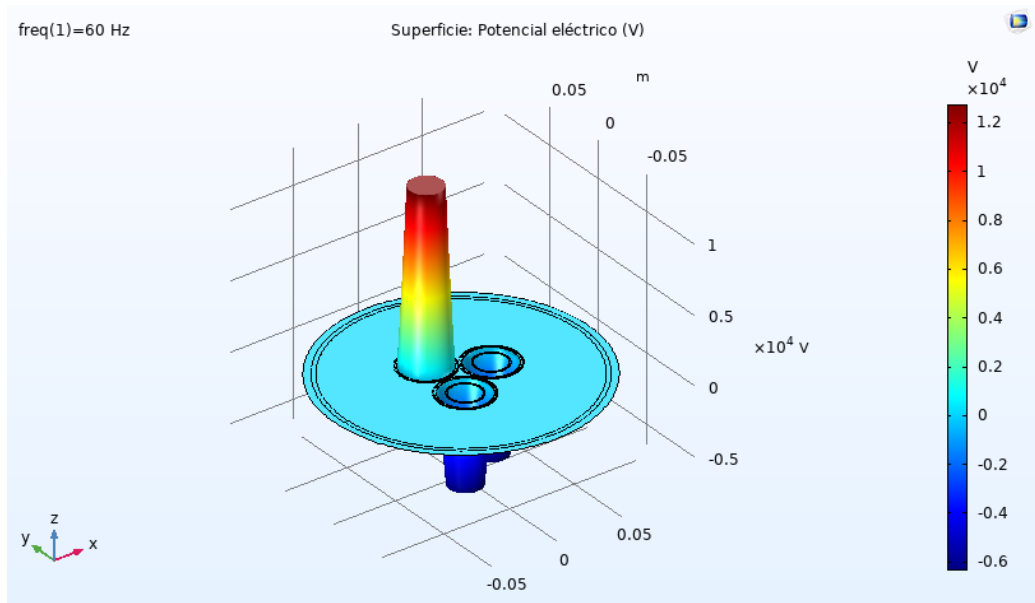


Figura 4.4 Potencial eléctrico en cable superconductor

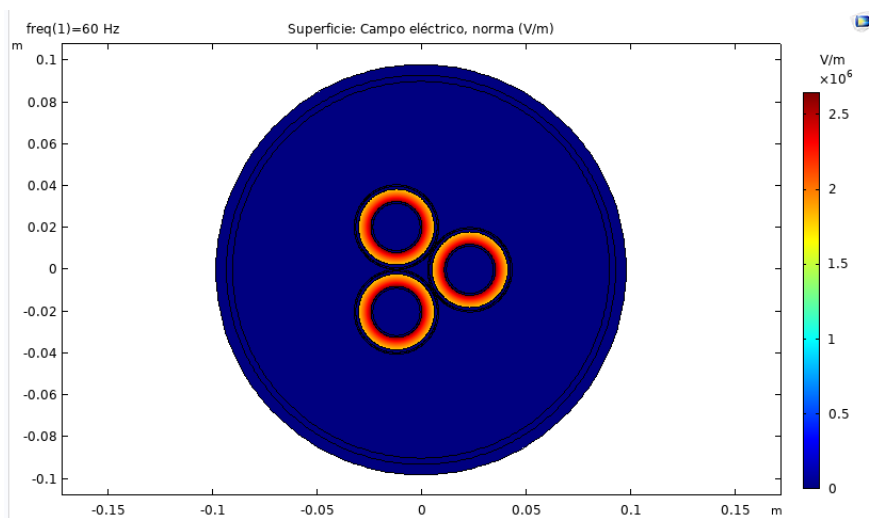
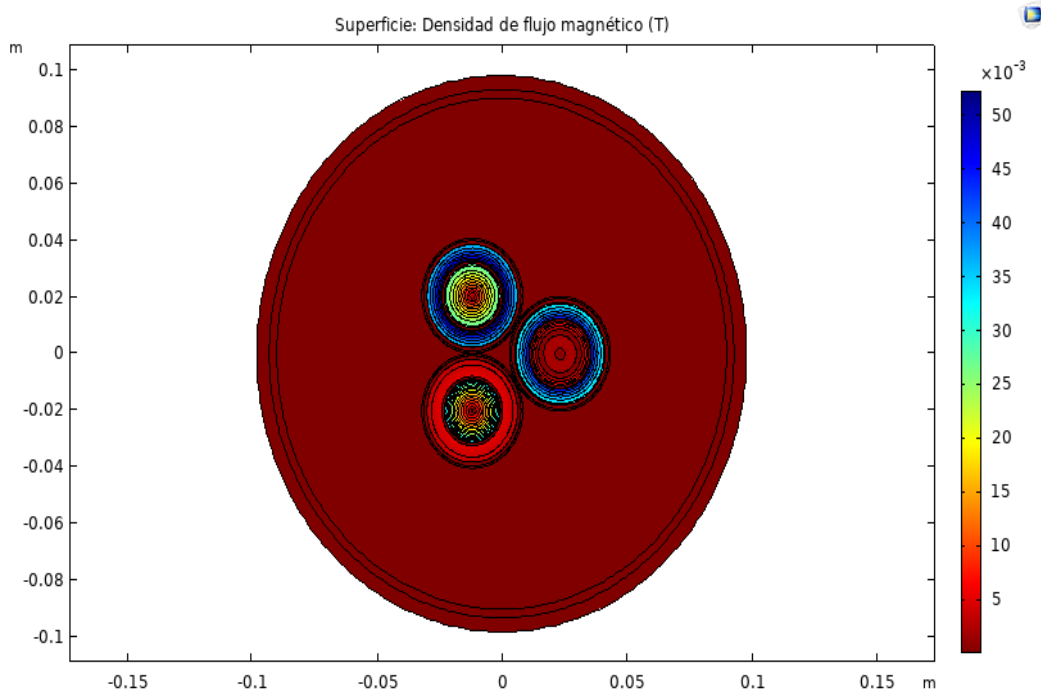


Figura 4.5 Campo eléctrico en cable superconductor

Tabla 4.4 Capacitancia de cable superconductor

Frecuencia [Hz]	Capacitancia de la fase 1 [nF/km]	Capacitancia de la fase 2 [nF/km]	Capacitancia de la fase 3 [nF/km]
60.000	352.57	352.57	352.57

## 4.2.2 Resistencia e Inductancia



**Figura 4.6** Densidad de flujo magnético cable superconductor

**Tabla 4.5** Resistencia e inductancia del cable superconductor

Resistencia (mΩ/km)	Inductancia (mH/km)	Reactancia inductiva (mΩ/km)
0.91940	0.0052803	1.9906

Las pérdidas en las fases, pantalla y molde del cable superconductor se muestran a continuación.

**Tabla 4.6** Pérdidas en cable superconductor

Pérdidas de fases (W/km)	Pérdidas de pantalla superconductor (W/km)	Pérdidas de pantalla de cobre (W/km)
0.0030427	0.0018846	4.5355x 10 <sup>-14</sup>

## 4.3 Red de Dos Puertos de los Cables en Estudio

Una vez se obtuvieron los parámetros eléctricos representativos de los cables en estudio por medio de las simulaciones realizadas en el programa Comsol Multiphysics se procede al cálculo de los parámetros ABCD y modelamiento de la red de dos puertos.



**Tabla 4.7** Resumen de resultados obtenidos

Cable	Resistencia (mΩ/km)	Inductancia (mH/km)	Capacitancia (nF/km)
Cable submarino	52.508	0.41909	138.34
Cable superconductor	0.9194	0.0052803	352.57

Para el modelo de cable submarino y en base a los resultados mostrados en la tabla 3.12 se obtienen los siguientes valores.

**Tabla 4.8** Parámetros del cable submarino

$z(\Omega/\text{km})$	$y(\text{mS}/\text{km})$	Long (km)	$Z(\Omega)$	$Y(\text{mS})$
$0.052508+j0.1579$	$j0.052153$	100	$5.2508+j15.79$	$j5.2153$

**Tabla 4.9** Parámetros ABCD del cable submarino

A	B	C	D
$0.9588+j13.69 \times 10^{-3}$	$5.2508+j 15.79$	$-3.57 \times 10^{-5} +j5.11 \times 10^{-3}$	$0.9588+j13.69 \times 10^{-3}$

Para el modelo del cable superconductor se obtuvieron los siguientes valores.

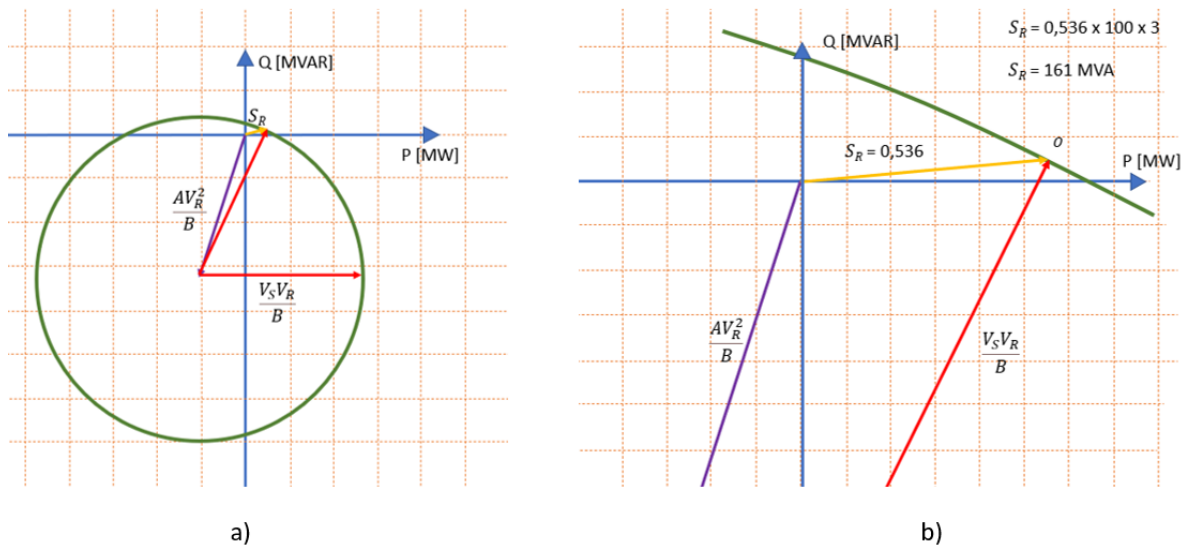
**Tabla 4.10** Parámetros del cable superconductor

$z(\Omega/\text{km})$	$y(\text{mS}/\text{km})$	Long (km)	$Z(\Omega)$	$Y(\text{mS})$
$0.0009194+j 0.0019906$	$j0.132915$	100	$0.09194+j 0.19906$	$j13.2915$

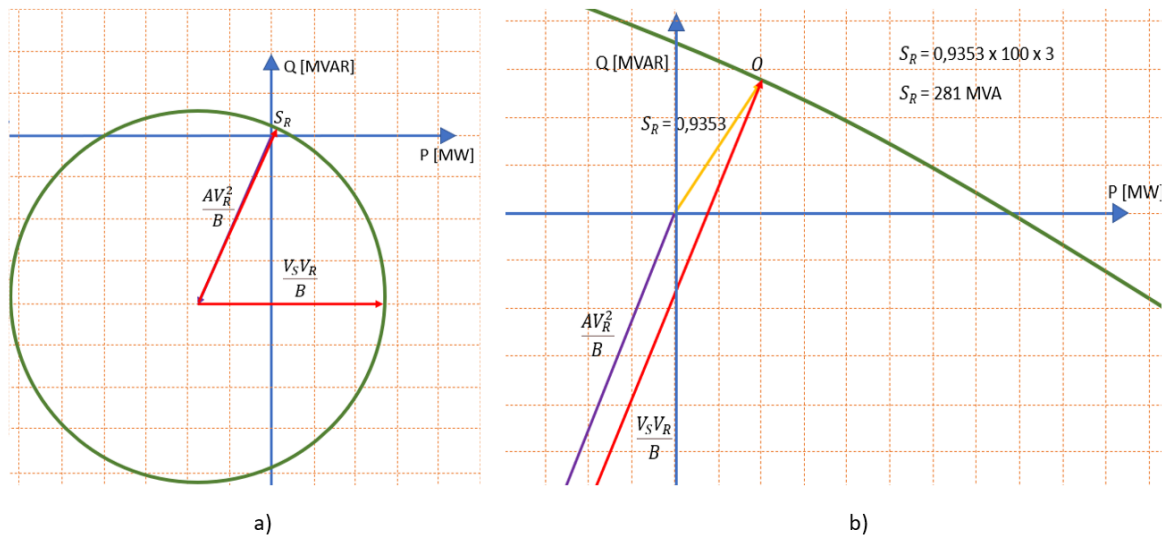
**Tabla 4.11** Parámetros ABCD del cable superconductor

A	B	C	D
$0.9986 + j 6.1 \times 10^{-4}$	$0.09194 + j 0.19906$	$-4.0606 \times 10^{-6} + j 0.01329$	$0.9986 + j6.1 \times 10^{-4}$

De acuerdo con los datos obtenidos y usando la ecuación 2.38 se procedió a realizar los diagramas de flujo de potencia para los cables en estudio.



**Figura 4.7** a) Diagrama de flujo de potencia de cable convencional, b) Ampliación al punto de operación



**Figura 4.8** a) Diagrama de flujo de potencia de cable superconductor, b) Ampliación al punto de operación

#### 4.4 Sistema de Prueba

Para poder realizar la comparación técnica-económica entre el cable submarino y el cable superconductor es necesario realizar simulaciones que involucren la capacidad de transmisión y pérdidas de energía en un sistema.

Para ello en este documento se utilizará el modelo IEEE de 9 barras en el cual se realizará una modificación y el programa Power World.

La modificación consiste en agregar una nueva a barra al sistema, “Barra 10” junto con un transformador reductor de relación 138/13.8 kV.

#### 4.4.1 Sistema IEEE 9 Barras (modificado)

Los parámetros de los elementos del sistema IEEE 9 barras (modificado) se detallan en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12** Parámetros de modelo IEEE 9 barras (modificado)

<b>Parámetros de Generadores</b>			
<b>Generador</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Barra	Barra 1	Barra 2	Barra 3
Potencia (MVA)	247.5	192	128
Voltaje (kV)	16.5	18	13.8
Factor de Potencia	1	0.85	0.85

<b>Parámetros de ramales</b>						
<b>Inicio</b>	<b>Final</b>	<b>Tipo</b>	<b>R (p.u)</b>	<b>X (p.u)</b>	<b>B/2 (p.u)</b>	<b>Capacidad (MW)</b>
Barra 1	Barra 4	Transformador	0	0.0576	0	300
Barra 2	Barra 7	Transformador	0	0.0625	0	300
Barra 3	Barra 9	Transformador	0	0.0586	0	300
Barra 5	Barra 10	Transformador	0	0.053	0	200
Barra 4	Barra 5	Línea de transmisión	0.01	0.068	0.088	100
Barra 4	Barra 6	Línea de transmisión	0.017	0.092	0.079	100
Barra 5	Barra 7	Línea de transmisión	0.032	0.161	0.153	100
Barra 6	Barra 9	Línea de transmisión	0.039	0.17	0.179	100
Barra 7	Barra 8	Línea de transmisión	0.0085	0.0576	0.0745	200
Barra 8	Barra 9	Línea de transmisión	0.0119	0.1008	0.1045	100

<b>Parámetros de carga</b>			
<b>Carga</b>	<b>Barra</b>	<b>Potencia Activa (MW)</b>	<b>Potencia Reactiva (MVar)</b>
1	Barra 5	160	50
2	Barra 6	90	30
3	Barra 8	150	35

Los valores en por unidad son calculados con valores base de 100 MVA y 138 kV.

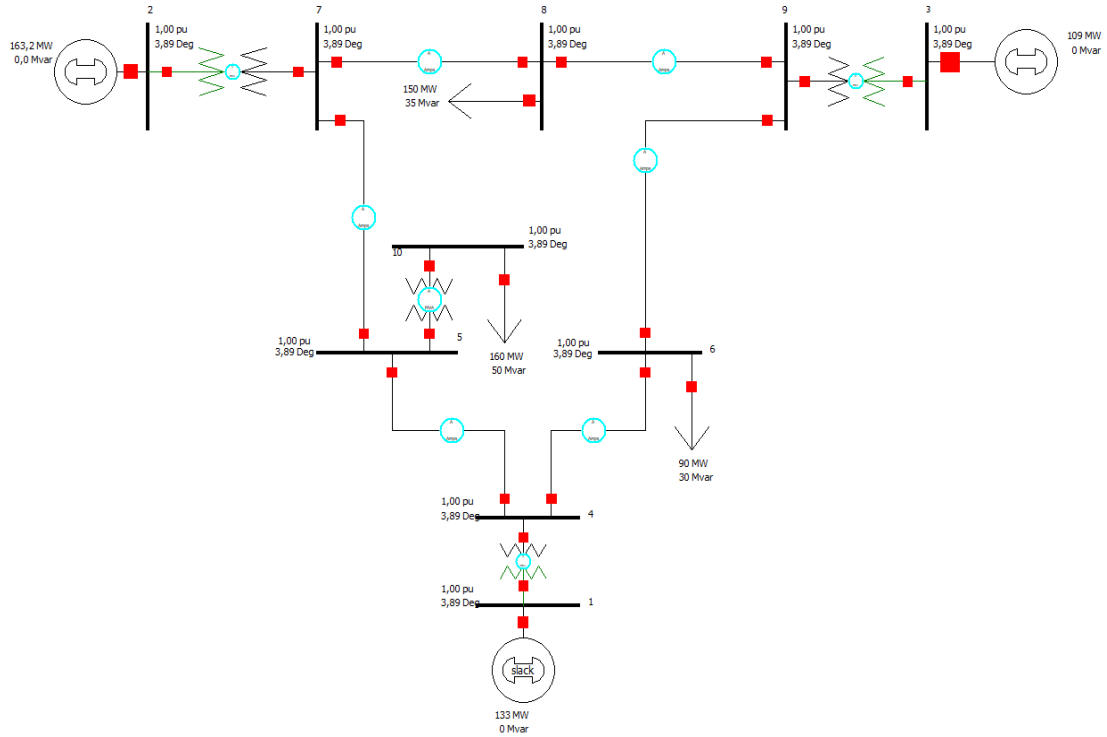


Figura 4.9 Modelo IEEE 9 barras modificado

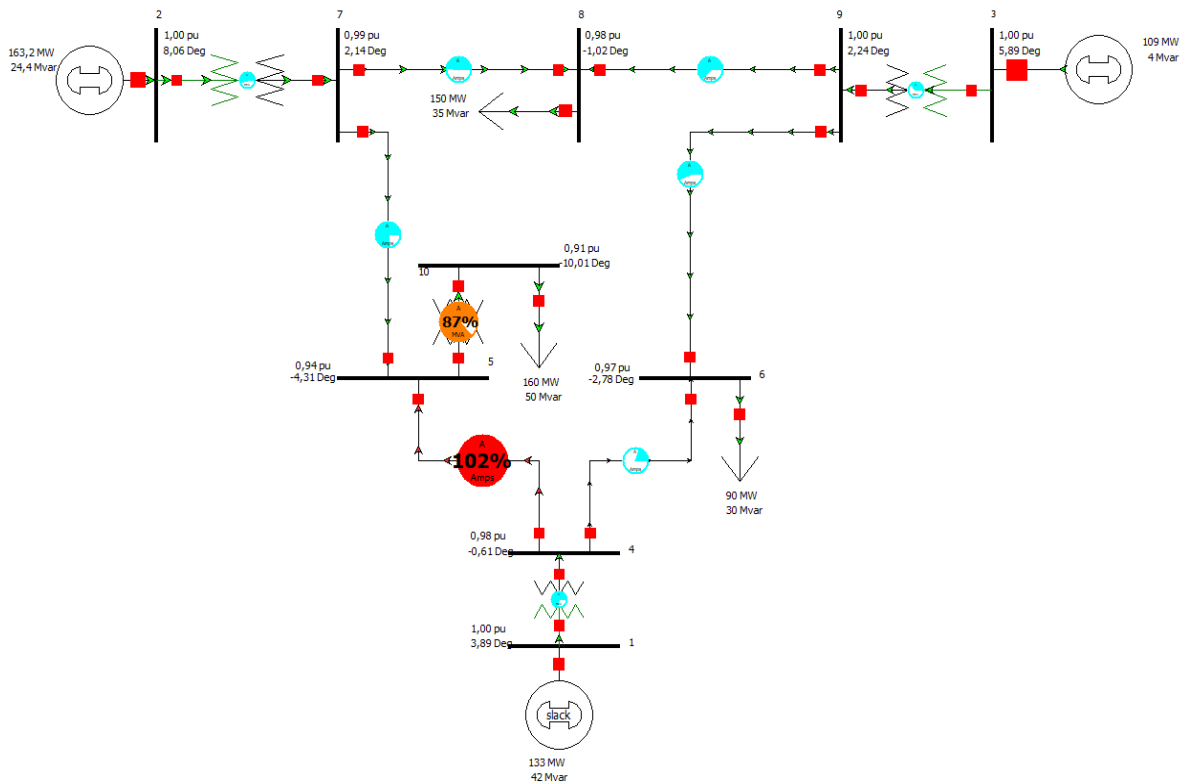


Figura 4.10 Resultado del flujo de potencia en el sistema

En la figura 4.10 se puede apreciar que el voltaje en la barra 5 es de 0.94 p.u, esto se debe a la alta cargabilidad que presenta la línea 4-5, la que se encuentra al 102% de su capacidad, además el transformador ubicado entre las barras 5-10 se encuentra al 87% de su capacidad nominal.

Esta sobrecarga tiene repercusiones serias en la vida útil del cable y del transformador incrementando el riesgo de daño.

Para mitigar la sobrecarga presente en la línea 4-5 se plantean los siguientes escenarios:

### **Escenario 1**

Interconexión entre la barra 5-9 a un nivel de voltaje de 138 kV mediante un cable submarino convencional. Se consideró la barra 5 debido a que es la barra de generación que cuenta con mayor disponibilidad de potencia. Esta conexión tiene la repercusión de cargar los transformadores entre las barras 3-9 y 5-10.

### **Escenario 1**

Interconexión entre la barra 3-10 a nivel de 13.8 kV a través de un cable superconductor submarino. Esta conexión no presenta repercusión alguna al sistema existente.

En las siguientes simulaciones se realizará el flujo de potencia con los dos modelos de cables estudiados en este documento, para luego comparar los resultados en cuanto a perfil de voltaje y cargabilidad de líneas se refiere.

## Simulación con Cable Submarino Normal

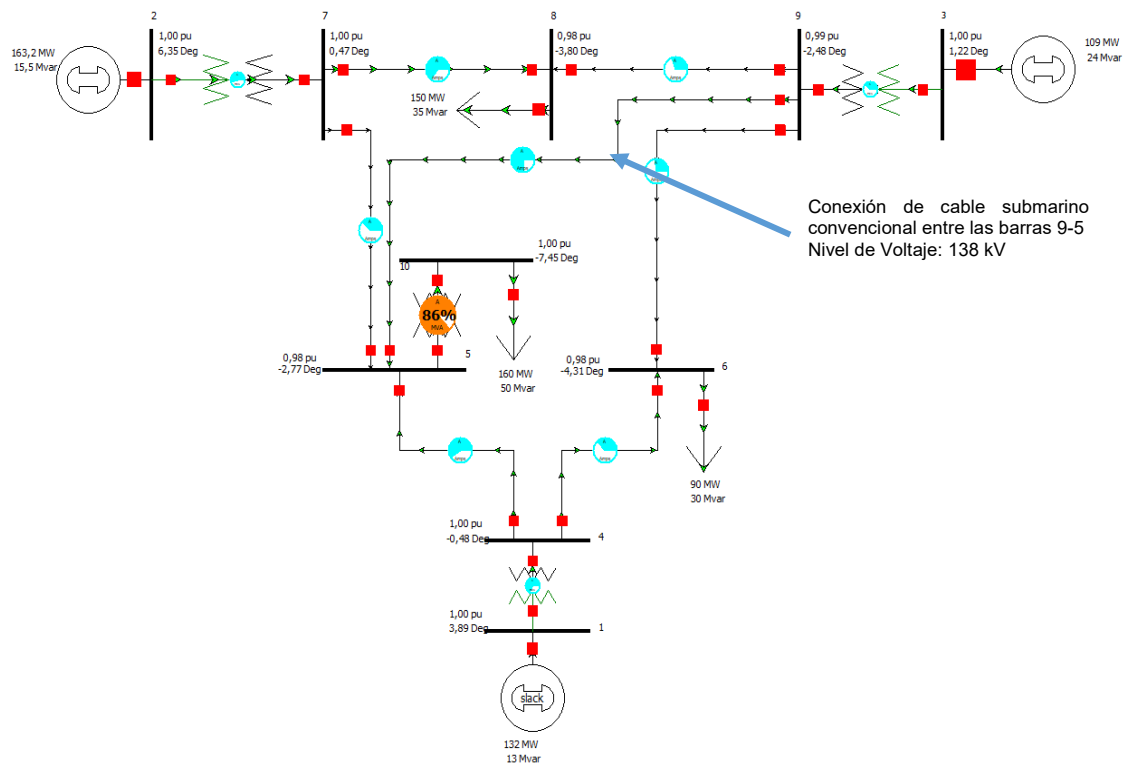


Figura 4.11 Flujo de potencia con cable submarino

## Simulación con Cable Superconductor Submarino

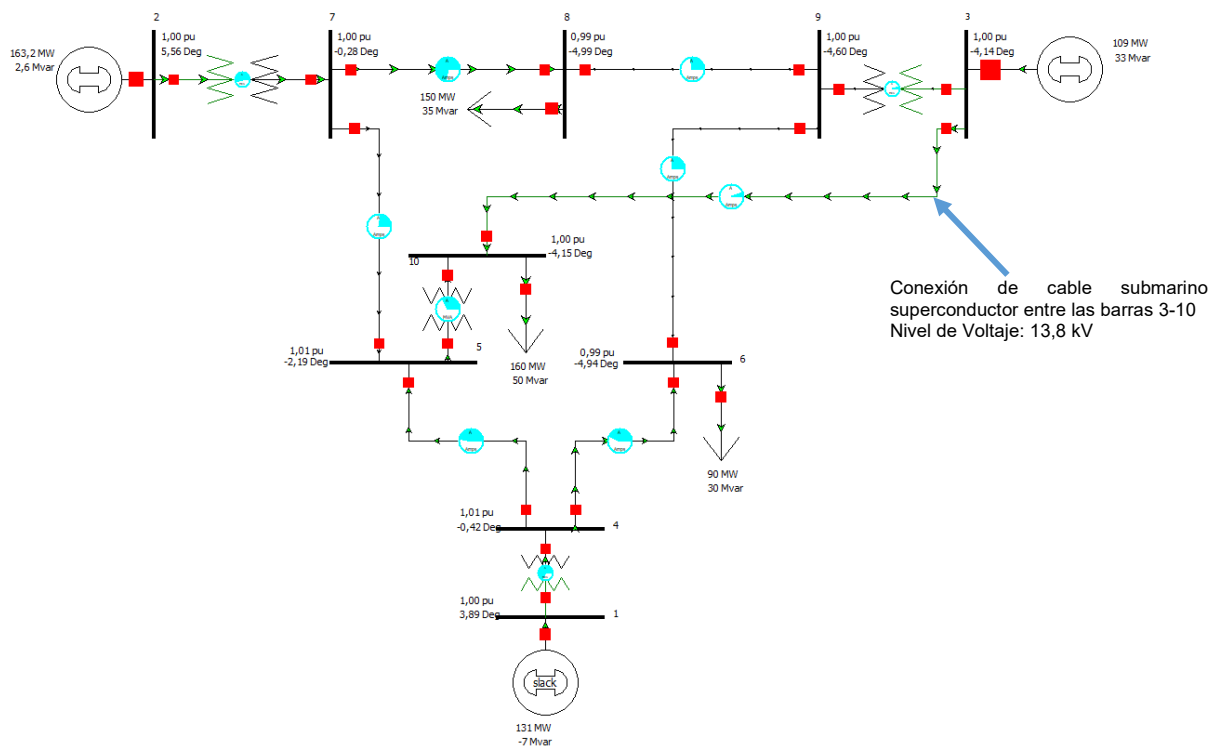


Figura 4.12 Flujo de potencia con cable superconductor

## **4.5 Análisis Económico**

En la presente sección se busca identificar el máximo beneficio entre las dos opciones de proyecto para la instalación de un cable submarino:

1. Proyecto de inversión 1: Compra de cable convencional.
2. Proyecto de inversión 2: Compra de cable superconductor.

Para el análisis económico a presentarse se calcularán los siguientes indicadores financieros:

- Flujo de caja esperado.
- Valor Actual Neto
- Tasa Interna de Retorno.
- Ratio Costo/ Beneficio.

Los cálculos antes mencionados se efectuarán con la finalidad de cuantificar los gastos/ costos y beneficios, y que esto permita efectuar un análisis de viabilidad de proyecto.

Para la elaboración de los cálculos correspondientes se plantearán supuestos, los cuales serán detallados en el próximo apartado.

### **4.5.1 Supuestos**

1. Para a proyección de ingresos en el flujo de caja se toma en consideración el crecimiento del consumo eléctrico del 3.96%, el cual corresponde a la tasa media anual calculada desde el año 2008 al 2018, datos obtenidos de [46].
2. El monto referencial de precio de energía corresponde al determinado en pliego tarifario de venta de energía el cual corresponde a 100 USD /MWh.
3. El valor referencial respecto a los precios de cables para cada proyecto, son obtenidos en estudio presentado por [33].

4. La tasa de descuento que se utiliza es del 12%.
5. Los costos y gastos totales se considera que corresponde al 70% de los ingresos obtenidos.
6. El cálculo de las pérdidas técnicas es efectuado por el autor considerando las pérdidas obtenidas en la sección 3.3.2 y 3.3.3.
7. Finalmente, la energía se calcula en función de la potencia que se transmite por cable correspondiente, siendo 67 MW para cable convencional y 95 MW para cable superconductor.

#### **4.5.2 Datos del estudio económico**

En el siguiente apartado se detallan los rubros estimados para cada una de las variables inmersas en el proyecto:

**Tabla 4.13** Datos supuestos para análisis económico

<b>Opción 1: Cable convencional (Valores expresados en Millones de dólares)</b>	<b>Monto</b>
<b>Inversión/ Costos- Gastos</b>	
Costo de cable y mano de obra (138 kV)	\$ 18.86
Costos y gastos totales	\$ -16.43
Ingresos	\$ 20.54
Pérdidas técnicas USD (MWh/año)	\$ -0.35
<b>Otros datos</b>	
Producción (MWh/año)	205,422
Pérdidas técnicas (MW)	0.670
Pérdidas técnicas (MWh/año)	3,473.28
<b>Vida útil</b>	25 años
<b>Opción 2: Cable superconductor (Valores expresados en Millones de dólares)</b>	<b>Monto</b>
<b>Inversión/ Costos- Gastos</b>	
Compra de cable y mano de obra (13.8 kV)	\$ 93.00
Gastos	\$ -23.30
<b>Ingresos</b>	<b>\$ 29.13</b>
<b>Otros datos</b>	
Producción (MWh/año)	291,270
<b>Vida útil</b>	25 años



Una vez efectuado los cálculos e identificando los rubros correspondientes a la inversión se elabora un flujo de caja esperado el cual se puede observar en el anexo 1.

Del flujo de caja esperado para cada proyecto se obtiene lo siguiente:

**Tabla 4.14** Cálculo de periodo de retorno de la inversión

Año	Flujo de efectivo esperado		Flujo de caja ajustado		Flujo de caja acumulado ajustado	
	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 1	Proyecto 2
0	-18.86	-93.00	-	-	-18.86	-93.00
1	3.20	4.95	2.85	4.42	-16.01	-88.58
2	3.32	5.15	2.97	4.60	-13.04	-83.98
3	3.46	5.35	3.08	4.78	-9.95	-79.20
4	3.59	5.56	3.21	4.97	-6.75	-74.24
5	3.73	5.78	3.33	5.16	-3.41	-69.07
6	<b>3.88</b>	6.01	<b>3.47</b>	5.37	<b>0.05</b>	-63.70
7	4.04	6.25	3.60	5.58	3.66	-58.12
8	4.20	6.50	3.75	5.80	7.40	-52.32
9	4.36	6.76	3.89	6.03	11.30	-46.29
10	4.53	7.02	4.05	6.27	15.35	-40.02
11	4.71	7.30	4.21	6.52	19.56	-33.50
12	4.90	7.59	4.38	6.78	23.93	-26.72
13	5.09	7.89	4.55	7.05	28.48	-19.68
14	5.30	8.20	4.73	7.32	33.21	-12.35
15	5.51	8.53	4.92	7.61	38.13	-4.74
16	5.72	<b>8.87</b>	5.11	<b>7.92</b>	43.24	<b>3.18</b>
17	5.95	9.22	5.31	8.23	48.55	11.41
18	6.19	9.58	5.52	8.56	54.07	19.96
19	6.43	9.96	5.74	8.89	59.82	28.86
20	6.69	10.36	5.97	9.25	65.79	38.11
21	6.95	10.77	6.21	9.61	71.99	47.72
22	7.23	11.19	6.45	9.99	78.45	57.71
23	7.51	11.64	6.71	10.39	85.15	68.10
24	7.81	12.10	6.97	10.80	92.13	78.90
25	8.12	12.58	7.25	11.23	99.38	90.13

Con el flujo de caja elaborado se calcula el tiempo en el cual se espera el retorno de la inversión y los indicadores tales como: VAN (Valor actual neto), TIR (tasa interna de retorno) y costo/beneficio.

**Tabla 4.15** Resumen de resultados análisis económico

<b>Tasa de descuento</b>	12.00%	
<b>Retorno de la inversión (años)</b>	<b>Proyecto 1</b>	<b>Proyecto 2</b>
	5.9	16.0
<b>TIR</b>	20.5%	6.0%
<b>VAN</b>	14.73	-40.98
<b>Ratio Costo Beneficio C/B</b>	<b>Proyecto 1</b>	<b>Proyecto 2</b>
Suma de ingresos	\$215.82	\$306.01
Suma de egresos	\$176.30	\$244.81
Costo- Inversión	\$195.16	\$337.81
C/B	1.11	0.91

#### **4.6 Análisis de Resultados**

Respecto a la capacitancia se puede observar que no existe una diferencia significativa entre los dos modelos de cables debido a la similitud de la estructura de la capa de aislamiento, distinto es el caso de la inductancia y sobre todo de la resistencia los cuales se puede indicar que son concordantes en relación con la literatura revisada.

Las pérdidas en el cable convencional se encuentran alrededor de los 67,578 W/km mientras que las del superconductor rondan los 0.0048 W/km, lo que representa una reducción del 99% debido a que la resistencia del cable convencional es 57 veces mayor al del cable superconductor.

Se puede observar que existe presencia del campo magnético fuera del cable convencional lo que puede afectar a la fauna marina que se encuentre cerca del mismo, este evento no ocurre en el modelo de cable superconductor donde se puede apreciar que no existe fugas de campo magnético hacia el exterior del cable.

El diagrama de flujo de potencia se elaboró con la premisa de que los voltajes en las barras de envío y recepción son constantes, resultando que el cable convencional puede transmitir cerca de 161 MVA a un voltaje de 138 kV mientras que el cable superconductor cuenta con una capacidad de transmisión de 281 MVA a un voltaje en barras de 13.8 kV lo que representa un incremento en la transmisión de potencia del 74% a un voltaje 10 veces menor, esto se debe a que el parámetro B (impedancia de transferencia en cortocircuito) es menor en el cable superconductor lo que permite una mayor transferencia de potencia.

De los flujos de potencia realizados al sistema planteado, técnicamente la opción del cable superconductor muestra un mejor escenario debido a que mejora la condición de sobrecarga de la línea 4-5 y del transformador 5-10.

Del análisis económico se puede observar que el proyecto de inversión para la instalación de un cable superconductor submarino es alto en comparación a la instalación de un cable convencional debido al costo del mismo material, el cual equivale a un 80% de la inversión inicial. En el análisis de ambos flujos de caja se puede identificar que estos no generan pérdidas económicas.

En cuanto a los valores correspondientes al VAN, el cual ayudará a estar al tanto de cuánto se va a ganar o perder con la inversión, se observa que refleja un valor positivo para la implementación de un cable submarino convencional y un valor negativo para el cable submarino superconductor, esto quiere decir que el primero logra superar el mínimo rendimiento esperado, o, en otros términos, los valores actuales de los flujos en el tiempo son mayores al desembolso inicial, en este caso el proyectos en términos económicos se considera viables y el proyecto de inversión del cable superconductor no es viable.

Complementando el análisis se calcula la TIR, la cual muestra la máxima tasa de descuento que puede tener el proyecto para que sea rentable, para el actual trabajo el proyecto 1 refleja un TIR de 20.49% y el proyecto 2 de 6.04%, considerando una tasa de descuento de 12%, el proyecto 1 es viable debido que el retorno es mayor a la tasa de descuento.

Además, se ejecuta el cálculo del periodo de retorno de la inversión, el cual es un juicio para valorar el periodo de tiempo en el que la inversión inicial será recuperada, para el presente caso refleja que para el proyecto 1 el periodo de tiempo de recuperación es de 5.9 años y en proyecto 2 de 16 años.

Finalmente, al calcular la relación costo beneficio, ya que se busca conocer si el proyecto es viable bajo varios enfoques, se encuentra que el proyecto 1, refleja un indicador de 1.11, lo cual representa que los beneficios son mayores a los costos, por lo cual el proyecto debe ser considerado a diferencia del proyecto 2 que el indicador es 0.91 mostrando que los costos superan los beneficios.

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

El programa Comsol Multiphysics es una herramienta útil para modelar elementos de la red eléctrica como los conductores, con lo que se puede obtener una estimación del comportamiento del elemento bajo circunstancias dadas.

En ambos modelos se obtuvo que el potencial eléctrico en el exterior del cable submarino es muy bajo por lo que se ignoraron los efectos eléctricos externos a los cables.

El cable superconductor debido a que cuenta con una pantalla formada por capa de cinta superconductora aísla y retiene en su interior el campo magnético a diferencia del cable convencional el que presenta fugas de campo.

Se determinaron los parámetros ABCD para los modelos de cables en estudio con lo que pudo elaborar el diagrama de flujo de potencia, en el que se pudo observar que en el cable superconductor el vector  $-\frac{|A||V_r|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha$  prácticamente se superpone al vector  $\frac{|V_s||V_r|}{|B|} \angle \beta - \delta$  el que representa el radio del círculo de potencia.

El modelo de cable superconductor representa una alternativa viable desde el punto de vista técnico en comparación a los cables convencionales, debido a que cuentan con una mayor capacidad de transmisión de potencia a un voltaje menor.

Una vez evaluado los indicadores financieros, se puede concluir que, respecto al análisis, ambos proyectos requieren una inversión alta, sin embargo, el proyecto 1 a pesar de generar pérdidas de energía lo cual genera un costo

adicional refleja ser viable, esto es debido al costo del cable ya que el superconductor es mucho mayor.

Este proyecto de inversión 1 contribuye una recuperación de inversión temprana, así mismo el retorno que este genera es positivo y mayor a la tasa de descuento fijada, finalmente el beneficio obtenido es superior al costo y la inversión.

En los análisis efectuados se puede observar que el proyecto con el cable convencional es viable y el proyecto con el cable superconductor no lo es en términos económicos.

Para la implementación del cable superconductor la inversión inicial es muy alta debido al costo del propio cable, a pesar de que esta implementación no genera pérdidas en la distribución de la energía, en términos económicos no es viable, sin embargo por los beneficios sociales que esta ejecución puede generar, se sugiere que se investigue a fondo el precio del cable y obtener propuestas de varios proveedores con la finalidad de optimizar el precio del cable, ya que con una simulación efectuada se obtiene que si se reduce el 45% del precio actual es decir la inversión del cable superconductor cambia de 93 millones de dólares a 51.15 millones de dólares, el proyecto se convierte a viable en términos económicos.

### **Recomendaciones.**

Para una mayor simplicidad del modelado de los elementos en el programa Comsol Multiphysics se recomienda el uso de un programa de diseño como Autocad o Solid Works y utilizar la interfaz de importación de diseños.

Realizar el modelado 3D para obtener una mayor precisión en los resultados siempre y cuando se cuente con los recursos computacionales.

Realizar un estudio considerando las pérdidas en los empalmes o uniones y terminaciones tanto del cable submarino convencional como el superconductor.

Considerar distintos materiales superconductores que actualmente se encuentran en estudio para analizar su comportamiento.

# Referencias

- [1] M. Barrenetxea, "Energy Conversion Scheme for Offshore DC Wind Turbines," 2016. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=250066> (accessed Oct. 19, 2021).
- [2] R. Flores, "La energía eólica no es tan limpia como la pintan," <https://nomada.gt/nosotras/volcanica/la-energia-eolica-no-es-tan-limpia-como-la-pintan/>, Oct. 02, 2018.
- [3] Sathyajith. Mathew, *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*. Springer, 2006.
- [4] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems." [Online]. Available: <http://www.ets.kth.se/ees>
- [5] J. X. Jin *et al.*, "HTS power devices and systems: Principles, characteristics, performance, and efficiency," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, pp. 1–26, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2602346.
- [6] F. Schmidt and A. Allais, "SUPERCONDUCTING CABLES FOR POWER TRANSMISSION APPLICATIONS-A REVIEW," 2004.
- [7] O. Romedenne Lagrange, "Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica," Barcelona, 2012.
- [8] D. Posso Palacio, "ESTADO DEL ARTE DE LOS SUPERCONDUCTORES ELECTRICOS Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERIA ELECTRICA," Santiago de Cali, 2010. Accessed: Nov. 17, 2021. [Online]. Available: <http://docplayer.es/15142514-Estado-del-arte-de-los-superconductores-electricos-y-sus-aplicaciones-en-la-ingenieria-electrica-diana-marcela-posso-palacio.html>



- [9] J. M. Juárez López, "ESTUDIO Y APLICACIÓN DEL MATERIAL SUPERCONDUCTOR  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  EN LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A ELÉCTRICA," Querétaro.
- [10] A. J. López Morales, "PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LA SELECCIÓN DE CONDUCTORES EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS PARA ÁREAS DE ALTO RIESGO IDENTIFICADAS POR LA NORMA IEC 60079-10," Guatemala, 2020.
- [11] J. D. Glover *et al.*, *POWER SYSTEM ANALYSIS & DESIGN*, Sixth Edition. CENGAGE Learning, 2015. [Online]. Available: [www.cengage.com/highered](http://www.cengage.com/highered)
- [12] B. A. Castillo Santos, "ESTUDIO TÉCNICO Y PRÁCTICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN SOTERRADAS CASO DE ESTUDIO LÍNEA DE TRANSMISIÓN S/E SHUSHUFINDI PAM-S/E SHUSHUFINDI CNEL A 69 KV," 2021.
- [13] M. Seco Ruiz, "Análisis térmico de cables submarinos HVAC enterrados en subsuelo marino," Sevilla, 2020.
- [14] T. Ruixiang, L. Naiyi, Y. Yong, J. Yongtao, W. Shaohe, and L. Te, "Calculation of Capacitance Parameters of XLPE Submarine Cable Based on Finite Element Method."
- [15] T. Worzyk, "Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects," *Power Systems*, vol. 39, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-01270-9.
- [16] D. González Canca, J. C. del Pino López, and P. L. Cruz Romero, "DISEÑO DE CABLES ELÉCTRICOS SUBMARINOS DE BAJA EMISIÓN MAGNÉTICA," Sevilla, 2015.

- [17] L. Jiménez Vergara, "Diseño Conceptual y Básico de una Interconexión HVDC para un Parque Eólico Offshore," Bogotá, 2014.
- [18] D. González Canca, "Caracterización Eléctrica de Cables Trifásicos Submarinos," Sevilla. Accessed: Nov. 19, 2021. [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle//11441/81162>
- [19] G. Migliavacca, *Advance Technologies for Future Transmission Grids*, Springer. Londres: Springer, 2013. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/4622>
- [20] L. Colla and E. Zaccone, "HVDC Land and Submarine Cables in the Mediterranean Area," 2018.
- [21] A. Macneill and M. El-Hawary, "Underwater power cable approximation models for offshore applications," Jan. 2015. doi: 10.1109/OCEANS.2014.7003293.
- [22] A. M. Macneill, "SUBMARINE POWER CABLE TRANSMISSION LINE PARAMETERS AND PERFORMANCE," 2012.
- [23] H. Montes Lujan, "INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA DE LAS ISLAS DEL ROSARIO," Bogotá, 2011.
- [24] M. El-Hawary, *Electrical Power Systems*, IEEE Press. New York: IEEE Press, 1983.
- [25] J. Poveda Desiderio and C. Ross Troya, "Análisis y Simulación de Redes de Dos Puertos (Circuitos Cuadripolos)," Guayaquil, 2019.
- [26] D. Perdomo Ruiz, "MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN," Medellín, 2019. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/p3fvek4d/r-Resistencia-de-fase-por-unidad-de-longitud-L-Inductancia-de-fase-por-unidad/>

- [27] D. Hernandez-Cano, G.-G. Figueroa-Godoy, F. & Razon-Gonzales, and Juan, "564 Artículo Revista de Tecnología e Innovación Análisis de la operación de líneas de transmisión con un enfoque basado en un diagrama de círculos de potencia en Matlab," 2015. [Online]. Available: [www.ecorfan.org/bolivia](http://www.ecorfan.org/bolivia)
- [28] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw Hill.
- [29] P. Jara Palcios, "SIMULACIÓN DE LOS VÓRTICES DE ABRIKOSOV EN MATERIALES SUPERCONDUCTORES UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS APLICADO AL MODELO GL," Cuenca, 2018.
- [30] Ó. Castaño Linares, "Síntesis y Caracterización de Láminas Delgadas Superconductoras de Altas Corrientes Críticas de YBA<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Obtenidas por M.O.D," Barcelona.
- [31] J. Li, M. Zhang, J. Zhu, Q. Yang, Z. Zhang, and W. Yuan, "Analysis of Superconducting Magnetic Energy Storage Used in a Submarine HVAC Cable Based Offshore Wind System," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 75, pp. 691–696. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.491.
- [32] L. Isola and A. Mezio, "Superconductividad," 2014.
- [33] Z. Zhang, S. Venuturumilli, M. Zhang, and W. Yuan, "SUPERCONDUCTING CABLES-NETWORK FEASIBILITY STUDY WORK PACKAGE 1 SUPERCONDUCTING CABLES-NETWORK FEASIBILITY STUDY WORK PACKAGE 1 Document Control Name Date Prepared by: Title: SUPERCONDUCTING CABLES-NETWORK FEASIBILITY STUDY WORK PACKAGE 1 Report Status: FINAL VERSION," 2016.

- [34] H. Thomas, A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückerad, D. Salmieri, and C. Rubbia, "Superconducting transmission lines - Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 59–72, Mar. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.041.
- [35] D. Politano, M. Sjoström, G. Schnyder, and J. Rhyner, "Technical and Economical Assessment of HTS Cables," 2001.
- [36] A. Gulian, *Shortcut to Superconductivity Superconducting Electronics via COMSOL Modeling*, 1st ed. Butornsville: Springer, 2020.
- [37] C. Xiao, W. Wang, B. Wei, H. Li, T. Jiao, and Y. Liu, "AC Loss Analysis of 35 kV High Temperature Superconducting Cables," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 34, no. 10, pp. 2485–2492, Oct. 2021, doi: 10.1007/s10948-021-05870-6.
- [38] Z. Zhang, "Electrical characterizing of superconducting power cable consisted of Second-Generation High-temperature superconducting tapes," Bath, 2016.
- [39] D. Willén, C. Matheus, D. Lindsay, and M. Gouge, "The application of triaxial high-temperature superconducting power cables in distribution networks," in *IEE Conference Publication*, 2005, vol. 1, no. 2005–11034, pp. 603–606. doi: 10.1049/cp:20050995.
- [40] E. F. Valero, "APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS," Barcelona, 2004.

- [41] J. C. Del-Pino-López, M. Hatlo, and P. Cruz-Romero, "On simplified 3D finite element simulations of three-core armored power cables," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113081.
- [42] "COMSOL Multiphysics Reference Manual," 1998. [Online]. Available: [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)
- [43] G. I. Cruz Peláez, "CÁLCULO DE PARÁMETROS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN CABLES DE ALTA TENSIÓN," 2015.
- [44] Comsol, "Submarine Cable 2-Capacitive Effects," 2021. [Online]. Available: [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks).
- [45] "XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems-User's Guide Rev 5 2 XLPE Submarine Cable Systems | ABB." [Online]. Available: [www.abb.com/cables](http://www.abb.com/cables)
- [46] CENACE, "INFORME ANUAL," Quito, 2020. Accessed: Jan. 19, 2022. [Online]. Available: <http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2020/>

## **ANEXOS**

## Flujos de caja de los proyectos

Tipo de Cable = Cable convencional

DETALLE	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Ingresos		\$ 20.54	\$ 21.36	\$ 22.20	\$ 23.08	\$ 23.99	\$ 24.94	\$ 25.93	\$ 26.96	\$ 28.03	\$ 29.14	\$ 30.29	\$ 31.49
(-)Costos y Gastos totales		\$ - 16.78	\$ - 17.45	\$ - 18.14	\$ - 18.85	\$ - 19.60	\$ -20.38	\$ 21.18	\$ 22.02	\$ 22.90	\$ 23.80	\$ 24.74	\$ 25.72
(-)Depreciación		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Total de egresos / costos		\$ - 16.78	\$ - 17.45	\$ - 18.14	\$ - 18.85	\$ - 19.60	\$ -20.38	\$ 21.18	\$ 22.02	\$ 22.90	\$ 23.80	\$ 24.74	\$ 25.72
<b>= Utilidad antes de impto.</b>		<b>\$ 3.76</b>	<b>\$ 3.91</b>	<b>\$ 4.06</b>	<b>\$ 4.23</b>	<b>\$ 4.39</b>	<b>\$ 4.57</b>	<b>\$ 4.75</b>	<b>\$ 4.94</b>	<b>\$ 5.13</b>	<b>\$ 5.33</b>	<b>\$ 5.55</b>	<b>\$ 5.77</b>
(-) Impuestos		\$ - 0.56	\$ - 0.59	\$ - 0.61	\$ - 0.63	\$ - 0.66	\$ - 0.69	\$ - 0.71	\$ - 0.74	\$ - 0.77	\$ - 0.80	\$ - 0.83	\$ - 0.86
<b>= Utilidad Neta</b>		<b>\$ 3.20</b>	<b>\$ 3.32</b>	<b>\$ 3.46</b>	<b>\$ 3.59</b>	<b>\$ 3.73</b>	<b>\$ 3.88</b>	<b>\$ 4.04</b>	<b>\$ 4.20</b>	<b>\$ 4.36</b>	<b>\$ 4.53</b>	<b>\$ 4.71</b>	<b>\$ 4.90</b>
Depreciación		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Inversión inicial	\$ - 18.86												
<b>Flujo de Caja. 1</b>	<b>\$ -18.86</b>	<b>\$ 3.20</b>	<b>\$ 3.32</b>	<b>\$ 3.46</b>	<b>\$ 3.59</b>	<b>\$ 3.73</b>	<b>\$ 3.88</b>	<b>\$ 4.04</b>	<b>\$ 4.20</b>	<b>\$ 4.36</b>	<b>\$ 4.53</b>	<b>\$ 4.71</b>	<b>\$ 4.90</b>

DETALLE	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
Ingresos	\$ 32.74	\$ 34.03	\$ 35.38	\$ 36.78	\$ 38.24	\$ 39.75	\$ 41.33	\$ 42.96	\$ 44.67	\$ 46.43	\$ 48.27	\$ 50.18	\$ 52.17
(-)Costos y Gastos totales	\$ -26.74	\$ - 27.80	\$ - 28.90	\$ - 30.05	\$ - 31.24	\$ - 32.47	\$ -33.76	\$ 35.10	\$ 36.49	\$ 37.93	\$ 39.43	\$ 41.00	\$ 42.62
(-)Depreciación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Total de egresos / costos	\$ -26.74	\$ - 27.80	\$ - 28.90	\$ - 30.05	\$ - 31.24	\$ - 32.47	\$ -33.76	\$ 35.10	\$ 36.49	\$ 37.93	\$ 39.43	\$ 41.00	\$ 42.62
<b>= Utilidad antes de impto.</b>	<b>\$ 5.99</b>	<b>\$ 6.23</b>	<b>\$ 6.48</b>	<b>\$ 6.73</b>	<b>\$ 7.00</b>	<b>\$ 7.28</b>	<b>\$ 7.57</b>	<b>\$ 7.87</b>	<b>\$ 8.18</b>	<b>\$ 8.50</b>	<b>\$ 8.84</b>	<b>\$ 9.19</b>	<b>\$ 9.55</b>
(-) Impuestos	\$ - 0.90	\$ - 0.93	\$ - 0.97	\$ - 1.01	\$ - 1.05	\$ - 1.09	\$ - 1.14	\$ - 1.18	\$ - 1.23	\$ - 1.28	\$ - 1.33	\$ - 1.38	\$ - 1.43
<b>= Utilidad Neta</b>	<b>\$ 5.09</b>	<b>\$ 5.30</b>	<b>\$ 5.51</b>	<b>\$ 5.72</b>	<b>\$ 5.95</b>	<b>\$ 6.19</b>	<b>\$ 6.43</b>	<b>\$ 6.69</b>	<b>\$ 6.95</b>	<b>\$ 7.23</b>	<b>\$ 7.51</b>	<b>\$ 7.81</b>	<b>\$ 8.12</b>
Depreciación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Inversión inicial													
<b>Flujo de Caja. 1</b>	<b>\$ 5.09</b>	<b>\$ 5.30</b>	<b>\$ 5.51</b>	<b>\$ 5.72</b>	<b>\$ 5.95</b>	<b>\$ 6.19</b>	<b>\$ 6.43</b>	<b>\$ 6.69</b>	<b>\$ 6.95</b>	<b>\$ 7.23</b>	<b>\$ 7.51</b>	<b>\$ 7.81</b>	<b>\$ 8.12</b>

TIR: 20.49%

VAN total = 15

Tipo de Cable = Cable superconductor

DETALLE	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Ingresos		\$ 29.13	\$ 30.28	\$ 31.48	\$ 32.73	\$ 34.02	\$ 35.37	\$ 36.77	\$ 38.23	\$ 39.74	\$ 41.31	\$ 42.95	\$ 44.65
(-)Costos y Gastos totales		\$ - 23.30	\$ - 24.22	\$ - 25.18	\$ - 26.18	\$ - 27.22	\$ - 28.30	\$ - 29.42	\$ - 30.58	\$ - 31.79	\$ - 33.05	\$ - 34.36	\$ - 35.72
(-)Depreciación		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Total de egresos / costos		\$ - 23.30	\$ - 24.22	\$ - 25.18	\$ - 26.18	\$ - 27.22	\$ - 28.30	\$ - 29.42	\$ - 30.58	\$ - 31.79	\$ - 33.05	\$ - 34.36	\$ - 35.72
<b>= Utilidad antes de impto.</b>		<b>\$ 5.83</b>	<b>\$ 6.06</b>	<b>\$ 6.30</b>	<b>\$ 6.55</b>	<b>\$ 6.80</b>	<b>\$ 7.07</b>	<b>\$ 7.35</b>	<b>\$ 7.65</b>	<b>\$ 7.95</b>	<b>\$ 8.26</b>	<b>\$ 8.59</b>	<b>\$ 8.93</b>
(-) Impuestos		\$ - 0.87	\$ - 0.91	\$ - 0.94	\$ - 0.98	\$ - 1.02	\$ - 1.06	\$ - 1.10	\$ - 1.15	\$ - 1.19	\$ - 1.24	\$ - 1.29	\$ - 1.34
<b>= Utilidad Neta</b>		<b>\$ 4.95</b>	<b>\$ 5.15</b>	<b>\$ 5.35</b>	<b>\$ 5.56</b>	<b>\$ 5.78</b>	<b>\$ 6.01</b>	<b>\$ 6.25</b>	<b>\$ 6.50</b>	<b>\$ 6.76</b>	<b>\$ 7.02</b>	<b>\$ 7.30</b>	<b>\$ 7.59</b>
Depreciación		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Inversión inicial	\$ - 51.15												
<b>Flujo de Caja. 2</b>	<b>\$ -51.15</b>	<b>\$ 4.95</b>	<b>\$ 5.15</b>	<b>\$ 5.35</b>	<b>\$ 5.56</b>	<b>\$ 5.78</b>	<b>\$ 6.01</b>	<b>\$ 6.25</b>	<b>\$ 6.50</b>	<b>\$ 6.76</b>	<b>\$ 7.02</b>	<b>\$ 7.30</b>	<b>\$ 7.59</b>

DETALLE	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
Ingresos	\$ 46.42	\$ 48.26	\$ 50.17	\$ 52.15	\$ 54.22	\$ 56.37	\$ 58.60	\$ 60.92	\$ 63.33	\$ 65.84	\$ 68.45	\$ 71.16	\$ 73.98
(-)Costos y Gastos totales	\$ - 37.13	\$ - 38.61	\$ - 40.13	\$ - 41.72	\$ - 43.38	\$ - 45.09	\$ - 46.88	\$ - 48.74	\$ - 50.67	\$ -52.67	\$ - 54.76	\$ - 56.93	\$ - 59.18
(-)Depreciación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Total de egresos / costos	\$ - 37.13	\$ - 38.61	\$ - 40.13	\$ - 41.72	\$ - 43.38	\$ - 45.09	\$ - 46.88	\$ - 48.74	\$ - 50.67	\$ -52.67	\$ - 54.76	\$ - 56.93	\$ - 59.18
<b>= Utilidad antes de impto.</b>	<b>\$ 9.28</b>	<b>\$ 9.65</b>	<b>\$ 10.03</b>	<b>\$ 10.43</b>	<b>\$ 10.84</b>	<b>\$ 11.27</b>	<b>\$ 11.72</b>	<b>\$ 12.18</b>	<b>\$ 12.67</b>	<b>\$ 13.17</b>	<b>\$ 13.69</b>	<b>\$ 14.23</b>	<b>\$ 14.80</b>
(-) Impuestos	\$ - 1.39	\$ - 1.45	\$ - 1.51	\$ - 1.56	\$ - 1.63	\$ - 1.69	\$ - 1.76	\$ - 1.83	\$ - 1.90	\$ - 1.98	\$ - 2.05	\$ - 2.13	\$ - 2.22
<b>= Utilidad Neta</b>	<b>\$ 7.89</b>	<b>\$ 8.20</b>	<b>\$ 8.53</b>	<b>\$ 8.87</b>	<b>\$ 9.22</b>	<b>\$ 9.58</b>	<b>\$ 9.96</b>	<b>\$ 10.36</b>	<b>\$ 10.77</b>	<b>\$ 11.19</b>	<b>\$ 11.64</b>	<b>\$ 12.10</b>	<b>\$ 12.58</b>
Depreciación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Inversión inicial													
<b>Flujo de Caja. 2</b>	<b>\$ 7.89</b>	<b>\$ 8.20</b>	<b>\$ 8.53</b>	<b>\$ 8.87</b>	<b>\$ 9.22</b>	<b>\$ 9.58</b>	<b>\$ 9.96</b>	<b>\$ 10.36</b>	<b>\$ 10.77</b>	<b>\$ 11.19</b>	<b>\$ 11.64</b>	<b>\$ 12.10</b>	<b>\$ 12.58</b>

TIR: 12.20%

VAN total = 1