

Trabajo de fin de grado

## Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

### Descripción y estudio de los enlaces HVDC en los sistemas eléctricos.

#### MEMORIA

**Autor:** Cristina Garcia Aguilar  
**Director:** Luis Sainz Sopera  
**Convocatoria:** Febrero 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

El proyecto estudia los enlaces de alta tensión en corriente continua (*High Voltage Direct Current*, HVDC). Dichos enlaces son utilizados para optimizar la distribución de energía eléctrica desde las fuentes de energía hasta los centros de consumo, sustituyendo las líneas de corriente alterna tradicionales. En el proyecto, se realizará un estudio y descripción de los enlaces HVDC para determinar sus características principales, aplicaciones presentes y ventajas e inconvenientes de estos enlaces. A partir del estudio anterior, se localizarán los enlaces HVDC existentes en la actualidad y se realizará una búsqueda y recopilación de información sobre los mismos con el objeto de elaborar una base de datos. Por último, se aprovechará la base de datos desarrollada para proponer algunos estudios sobre las problemáticas habituales en estos nuevos sistemas de transmisión de energía eléctrica.

# Sumario

<b>Resumen</b> .....	<b>3</b>
<b>Sumario</b> .....	<b>4</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Glosario</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Prefacio</b> .....	<b>7</b>
2.1 Origen del proyecto.....	7
2.2 Motivación.....	10
2.3 Requerimientos previos.....	10
<b>3. Introducción</b> .....	<b>11</b>
3.1 Objetivos del proyecto.....	11
3.2 Alcance del proyecto .....	11
<b>4. Transmisión eléctrica</b> .....	<b>13</b>
<b>5. Enlaces HVDC</b> .....	<b>15</b>
<b>5.1 Comparación HVDC y HVAC</b> .....	<b>15</b>
5.1.1 Consideraciones técnicas .....	16
5.1.2 Consideraciones medioambientales .....	18
5.1.3 Consideraciones económicas .....	18
<b>5.2 Tecnologías HVDC</b> .....	<b>22</b>
5.2.1 LCC-HVDC.....	22
5.2.2 VSC-HVDC.....	25
<b>5.3 Configuraciones HVDC</b> .....	<b>27</b>
5.3.1 Configuración back-to-back.....	27
5.3.2 Configuración punto a punto .....	28
5.3.3 Configuración Multiterminal.....	28
5.3.4 Configuración Unitaria.....	29
<b>5.4 Modos de transmisión HVDC</b> .....	<b>29</b>
5.4.1 Conexión monopolar .....	29
5.4.2 Conexión bipolar .....	30
5.4.3 Conexión homopolar .....	31
<b>6. Estudio proyectos HVDC en el mundo</b> .....	<b>32</b>
<b>6.1 Base de datos</b> .....	<b>32</b>
6.1.1 MATLAB.....	33
<b>6.2 Proyectos a destacar</b> .....	<b>36</b>
<b>6.3 Proyectos en España</b> .....	<b>37</b>
6.3.1 Cometa.....	37
6.3.2 Inelfe.....	39
<b>6.4 Posibilidades de la base de datos</b> .....	<b>41</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>42</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>43</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>44</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Sistema de transmisión HVDC.....	15
Figura 2: Efecto pelicular.....	20
Figura 3: Comparativa costes HVDC/HVAC en función de la distancia.....	21
Figura 4: Tiristor .....	22
Figura 5: Esquema de un sistema LCC-HVDC [5]. .....	24
Figura 6: Transistores BJT y MOSFET (C≡D, E≡S) .....	25
Figura 7: Transistor IGBT .....	25
Figura 8: Esquema de un sistema VSC-HVDC [5]. .....	26
Figura 9: Configuración back-to-back [6]. .....	28
Figura 10: Configuración punto a punto [6]. .....	28
Figura 11: Configuración Multiterminal [6]. .....	29
Figura 12: Esquema conexión monopolar [6]. .....	30
Figura 13: Esquema conexión bipolar [6]. .....	31
Figura 14: Esquema conexión homopolar [6]. .....	31
Figura 15: Ventana que aparece cuándo se ejecuta el programa.....	33
Figura 16: Listado de proyectos HVDC existentes en Canadá. ....	34
Figura 17: Información técnica del proyecto HVDC 'Nelson River Bipole 1'. ....	35
Figura 18: Mensaje que aparece si buscamos 'Tanzania' en la base de datos. ....	35
Figura 19: Mensaje que aparece si escribimos mal el nombre de un proyecto. ....	36
Figura 20: Interconexión Valencia-Mallorca [8]. .....	38
Figura 21: Información técnica del proyecto HVDC 'Cometa'. ....	38
Figura 22: Información técnica del proyecto HVDC 'Inelfe'. .....	40

# 1. Glosario

AT *Alta tensión*

BT *Baja tensión*

CA *Corriente Alterna*

CC *Corriente Continua*

HVAC *High Voltage Altern Current*

HVDC *High Voltage Direct Current*

LCC *Line Conmutated Converters*

MAT *Muy alta tensión*

MT *Media tensión*

REE *Red Eléctrica de España*

VSC *Voltage Source Converters*

## 2. Prefacio

### 2.1 Origen del proyecto

Alrededor del año 600 a.C., Thales de Miletus descubrió que al frotar el ámbar, este adquiere el poder de atraer determinados objetos [1]. Años después, Theophrastus realizó el primer estudio científico de la electricidad [1]. Desde entonces la electricidad se ha convertido en algo indispensable para el ser humano. El transporte, la alimentación, el trabajo y el cobijo son necesidades humanas en las que la energía tiene un papel fundamental.

Desde la invención de la primera bombilla hasta hoy, la demanda de energía eléctrica ha ido aumentando sin descanso. Se espera que la demanda anual energética aumente a un ritmo del 1,8% hasta el 2030. Los países industrializados disminuirán el crecimiento de su demanda energética al 0,4% anual. Sin embargo, está previsto que, en los países en desarrollo, dicha demanda crecerá rápidamente. Alrededor del 2030 está previsto que más de la mitad de demanda energética a nivel mundial sea requerida por dichos países en desarrollo. [2]

Existen varios métodos de generación de energía, clasificados en dos grupos: renovables y no renovables, donde los recursos no son limitados y finitos, respectivamente.

Las fuentes de generación de energía suelen encontrarse alejadas de los centros de consumo, por eso es importante realizar un transporte económico y eficiente de dicha energía. Es aquí donde se refleja la importancia de los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Los sistemas HVDC nacieron en el año 1954 con el proyecto Gotland, primer proyecto de transmisión energética que utilizó la tecnología HVDC. Situado en Suecia, este proyecto conectaba Ygne, una región situada en la isla de Gotland con Västervik, en la parte continental de Suecia. El proyecto fue la primera línea de transporte comercial, transmitía una potencia de 20 MW a un voltaje de corriente continua (CC) de 100 kV y fue llevado a cabo por ABB. La interconexión entre Ygne y Västervik se realizó a través de 96 km de líneas submarinas y 7 km de líneas aéreas. [3]

Desde entonces, la tecnología HVDC han ido tomando un papel cada vez más importante en el mundo de la transmisión energética. Actualmente hay más de 180 proyectos HVDC en funcionamiento o en construcción alrededor del mundo.

La tecnología HVDC presenta muchas ventajas respecto a otras tecnologías:

- Permite realizar transportes de largas longitudes de manera eficiente ya que sus pérdidas son pequeñas. Las líneas de los sistemas HVDC solamente transmiten flujo de potencia activa, en cambio, las líneas de sistemas HVAC (*High Voltage Altern Current*) transmiten tanto flujo de potencia activa como reactiva. Esto supone que las pérdidas de los sistemas HVDC sean menores que en los sistemas HVAC. Eso también significa que para líneas de transporte largas, el coste de inversión total sea menor en sistemas de continua que de alterna.
- Permite la interconexión de sistemas de corriente alterna (CA) asíncronos.
- Los sistemas presentan mucha estabilidad: si se somete al sistema a algún tipo de perturbación, este es capaz de volver a su estado normal de funcionamiento.
- Un control preciso del flujo de potencia activa del sistema.
- La tecnología HVDC es menos perjudicial para el medioambiente que la tecnología HVAC.
- Las líneas de transmisión energética pueden ser aéreas, subterráneas o submarinas.

Por otro lado, la tecnología HVDC juega un papel fundamental en la incorporación de fuentes de energía renovable en las redes energéticas. De hecho gracias a ella, el uso de la energía eólica ha evolucionado mucho en los últimos años.

Gracias a los avances tecnológicos, es posible la aplicación de esta tecnología tanto en proyectos *onshore* como en proyectos *offshore*. Estos últimos permiten conectar a la red eléctrica parques eólicos situados en puntos estratégicos en el mar dónde las condiciones de viento sean más favorables. Además, se evita construir en un medio tan explotado como el terrestre. La tecnología basada en convertidores en fuente de tensión (*Voltage Source Converters, VSC*) parece la más adecuada para realizar este

tipo de interconexión ya que presenta ventajas tanto técnicas como económicas respecto a otras soluciones técnicas.

Actualmente, la industria de energía eléctrica busca un cambio en el modelo de negocio de las redes eléctricas. El gran reto de las empresas eléctricas es el desarrollo de las famosas redes inteligentes (smart grid, en inglés). Su objetivo buscar la máxima eficiencia energética y garantizar sistemas sostenibles, seguros y de alta calidad. Su funcionamiento se basa en la aplicación de modernas tecnologías de información que permiten una comunicación fluida en las dos direcciones de la red. Por tanto, estas redes permiten un intercambio de datos entre las empresas distribuidoras y los usuarios. Los enlaces HVDC juegan un papel fundamental en el desarrollo de las redes inteligentes. La incorporación de las redes inteligentes al mercado supondría un ahorro energético y económico importante. Son el siguiente gran paso hacia un mundo más sostenible y responsable y es por eso que las empresas eléctricas apuestan por su desarrollo.

Actualmente existen dos tecnologías principales en las que se dividen los sistemas HVDC la tecnología Convencional o LCC (*Line Commutated Converters*), que utiliza convertidores en línea basados en tiristores; y la tecnología VSC, que utiliza convertidores basados en IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). La tecnología LCC es la utilizada tradicionalmente en los proyectos HVDC, pero los avances tecnológicos y el desarrollo de los convertidores en fuente de tensión han hecho que la tecnología VSC sea la elegida para los futuros proyectos.

Existen 3 tipos de configuraciones de los enlaces HVDC en función del número de estaciones que presente el enlace:

- Back-to-back: Solamente hay una estación transformadora.
- Punto a punto: Es la configuración más habitual y presenta dos estaciones transformadoras, una a cada extremo de las líneas de transmisión.
- Multiterminal: Hay tres o más estaciones transformadoras. El primer proyecto con configuración multiterminal se desarrolló en 1990 y actualmente existen 6 proyectos con esta configuración en todo el mundo.

## 2.2 Motivación

Se puede decir que hoy en día los proyectos HVDC se han abierto un camino en la transmisión de energía. A pesar de que actualmente la mayoría de proyectos de transmisión energética utilicen corriente alterna, existen muchos proyectos HVDC y cada vez se apuesta más por esta nueva tecnología.

Al ser una tecnología relativamente nueva, la información sobre los proyectos creados hasta ahora no es muy accesible. Además, al ser una tecnología que está ganando tanto terreno en el mundo de la energía eléctrica, se realizan muchos estudios y se desarrollan cada vez más proyectos. Es por eso que se ha decidido realizar una búsqueda de todos los proyectos HVDC del mundo con sus características más relevantes. A partir de esta búsqueda y recopilación se ha realizado una base de datos que permite acceder a toda la información posible de una manera fácil y ordenada.

## 2.3 Requerimientos previos

Antes de redactar el trabajo, se realizó una profunda búsqueda y estudio de información para entender los conceptos que se han desarrollado durante el trabajo. La información se obtuvo de trabajos de *UPCommons* realizados anteriormente que tratan sobre temas relacionados con este trabajo, de webs de grandes empresas en tecnologías eléctricas como ABB y Siemens y en diferentes referencias en internet.

Además, previamente al redactado del trabajo, se ha realizado una base de datos con información técnica sobre los proyectos HVDC existentes en el mundo. Esto ha sido posible gracias a los conocimientos básicos de programación obtenidos en las asignaturas de informática. Algunos de los datos técnicos que aparecen en la memoria se han obtenido de dicha base de datos.

Gracias a esta búsqueda de información, junto con los conocimientos básicos sobre la ingeniería eléctrica adquiridos en asignaturas como Electromagnetismo, Electrotecnia y Máquinas Eléctricas, se ha podido desarrollar el trabajo. Además, durante la investigación y estudio se han alcanzado conocimientos avanzados sobre tecnología eléctrica.

## **3. Introducción**

### **3.1 Objetivos del proyecto**

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio sobre todos los proyectos HVDC, en construcción o en funcionamiento, del mundo.

Además se pretende realizar una base de datos en la que introducir todos estos proyectos y su información técnica más relevante. De esta manera se puede acceder a la información de una manera rápida y sencilla de los 181 proyectos HVDC que contiene la base de datos. Los datos técnicos que aparecen al buscar un proyecto HVDC en el programa son: nombre del proyecto HVDC, continente donde se ubica, nombre de la estación 1 y el país donde se encuentra, nombre de la estación 2 (si el proyecto tiene más de una estación) y el país donde se encuentra, nombre de las estación 3 y 4 (si existen) y el país donde se encuentran, el año de puesta en marcha o año previsto si el proyecto aún no está en funcionamiento, capacidad de transmisión de potencia (MW), voltaje en CA (V), voltaje en CC (V), longitud total de las líneas de transmisión (km), longitud de las líneas submarinas (km), longitud de las líneas aéreas (km), longitud de las líneas subterráneas (km), tipo de proyecto (punto a punto, back-to-back o multiterminal), proveedor del proyecto y, por último, un link para acceder a una web con más información del proyecto que puede ser de utilidad.

### **3.2 Alcance del proyecto**

Las fuentes de energía suelen encontrarse bastante alejadas de los centros de consumo por lo que es fundamental desarrollar una red energética eficiente sea capaz de transportar la energía eléctrica de manera segura y con las menores pérdidas posibles. Además, las distancias de transmisión cada vez son más grandes ya que la implementación de sistemas de generación con fuentes renovables como los campos fotovoltaicos, las centrales hidroeléctricas y los parques están limitados por la geografía y se localizan en puntos estratégicos que suelen estar alejados de los centros de consumo.

El desarrollo de la tecnología HVDC ha supuesto un gran avance en la distribución energética ya que presenta menores pérdidas que la tecnología HVAC utilizada convencionalmente. Según la empresa ABB, una línea HVDC

de 2.000 km a 800 kV presenta unas pérdidas de alrededor del 5% que se disipan en calor, mientras que la línea equivalente en CA perdería el doble, un 10% [4].

Cada vez se están implementando más proyectos HVDC y las empresas eléctricas apuestan por esta tecnología como la tecnología en la que se base la red energética del futuro. Pero, al ser una tecnología relativamente nueva (66 años desde la puesta en marcha del primer proyecto HVDC) la falta de información y experiencia hace que los avances se ralenticen [3].

Este proyecto se basa en el estudio de los sistemas HVDC y sus características principales, así como la búsqueda de información técnica de todos los proyectos HVDC en funcionamiento o desarrollo del mundo. Facilitando así la búsqueda de información de interés de proyectos ya existentes y así agilizar el desarrollo de proyectos futuros.

## 4. Transmisión eléctrica

La electricidad se suele generar en centrales eléctricas que están lejos de las cargas, por lo que es importante estudiar la transmisión de energía eléctrica desde las fuentes hasta los puntos de consumo y optimizarla al máximo.

Según la norma NTC 1340, los niveles de tensión nominal ( $U_n$ ) en corriente eléctrica se clasifican de la siguiente manera [5]:

- Baja tensión (BT):  $U_n \leq 1000 \text{ V}$
- Media tensión (MT):  $1000 \text{ V} < U_n \leq 35 \text{ kV}$
- Alta tensión (AT):  $35 \text{ kV} < U_n \leq 230 \text{ kV}$
- Muy alta tensión (MAT):  $U_n > 230 \text{ kV}$

Debido a limitaciones técnicas la energía no se puede generar a voltajes muy elevados y además los centros de consumo de energía requieren corriente alterna. Por tanto, la energía sale del emisor y llega al receptor en alterna y a MT.

Sin embargo, la energía eléctrica suele circular a voltajes muy elevados por las líneas de transmisión alrededor de los 100 y 400 kV [5]. Por tanto, se dice que la energía eléctrica circula a AT y a MAT especialmente en largas distancias. Esto es debido a que cuánto mayor es el voltaje, menor es la intensidad que circula y por tanto menores son las pérdidas. Por lo que la eficiencia del sistema de transmisión es más elevada si la energía se transporta en altos voltajes ya que las pérdidas  $P_p$  por efecto Joule se reducen,

$$P_p = I^2 \cdot R \quad (1)$$

donde,

$P_p$ : Potencia perdida en la línea de transmisión.

$I$ : Intensidad que circula por el conductor (línea de transmisión).

$R$ : Resistencia del conductor.

Por otro lado, la energía puede transportarse en CC o en CA.

La CC circula en un sentido por el conductor, en cambio, la CA circula periódicamente en los dos sentidos del conductor. Históricamente, el transporte de la energía eléctrica se realizó en CA ya que estaba tecnológicamente desarrollado el procedimiento para elevar la tensión en CA mediante transformadores mientras que el control y gestión de la CC no estaba desarrollado. En la actualidad, el desarrollo de la electrónica de potencia ha permitido controlar la CC de forma que su utilización para el transporte de energía eléctrica está empezando a verse como una alternativa mejor y más eficiente que el transporte en CA.

La transmisión de la electricidad puede realizarse mediante líneas aéreas, subterráneas o submarinas.

## 5. Enlaces HVDC

### 5.1 Comparación HVDC y HVAC

La energía se genera en CA en centrales eléctricas en MT, seguidamente se ajusta el voltaje mediante un transformador para que circule por las líneas de transmisión a AT y, antes de llegar al receptor se vuelve a ajustar a MT con otro u otros transformadores en cascada.

Los enlaces HVDC, se están empezando a utilizar actualmente para transportar energía eléctrica.

Los sistemas de transmisión HVDC constan, además de transformadores, de convertidores al inicio y al final de las líneas. La corriente ajustada por el primer transformador pasa por un convertidor que trabaja como rectificador y se encarga de convertirla de alterna a continua. Esta energía en continua circula por las líneas de transmisión hasta llegar a otro convertidor que hace de inversor. El inversor vuelve a transformar la CC en alterna antes de que pase por el transformador y llegue al receptor (ver **Error! Reference source not found.**).

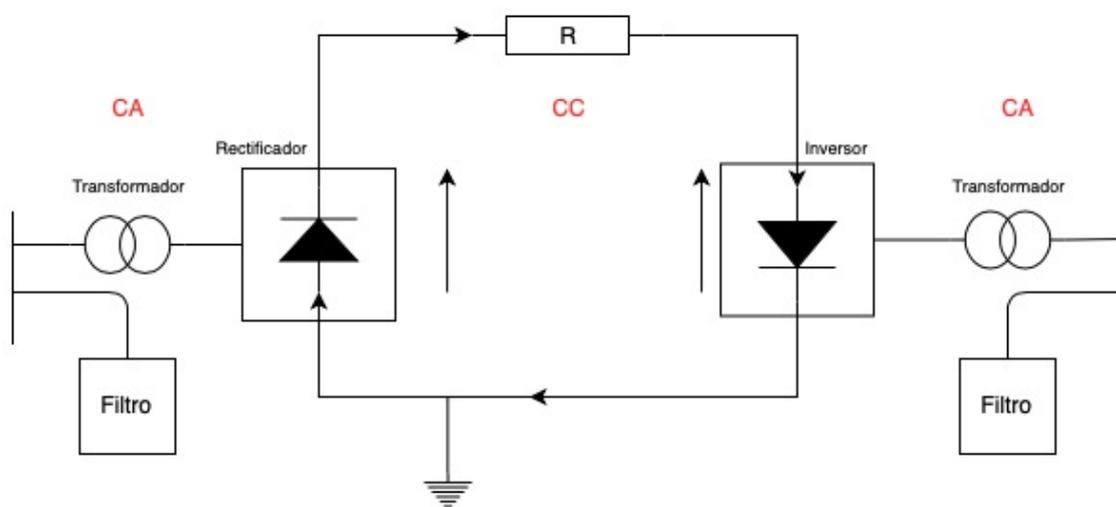


Figura 1: Sistema de transmisión HVDC.

Hoy en día, la transmisión de energía eléctrica se realiza, mayoritariamente, en CA. Esto se debe a que es mucho más sencilla la transformación de la energía que en CC ya que no requiere rectificadores ni inversores.

Sin embargo, los avances de la electrónica de potencia y la optimización de las líneas de transporte han hecho que cada vez existan más proyectos de transporte mediante tecnología HVDC.

La conveniencia de utilizar HVDC o HVAC en los distintos proyectos, no solo depende de la viabilidad técnica, si no también de factores medioambientales y económicos.

### 5.1.1 Consideraciones técnicas

Existen varios criterios técnicos que permiten decantarnos por u otra tecnología:

- **Interconexión asíncrona:** A veces es necesario conectar dos redes eléctricas que se encuentran a distinta frecuencia. La tecnología HVDC permite conectar dos sistemas asíncronos, en cambio con la tecnología HVAC no es posible. Además, las redes HVDC no transfieren las oscilaciones ni perturbaciones de un sistema a otro.
- **Estabilidad:** Se dice que un sistema eléctrico es estable cuando, al someterlo a algún tipo de perturbación, el sistema es capaz de volver al estado de funcionamiento normal.

En un sistema HVAC dicha estabilidad se formula:

$$P = \frac{U_1 * U_2}{X_L} * \sin \delta \quad (2)$$

Dónde  $U_1$  y  $U_2$  son las tensiones en cada extremo de la conexión,  $X_L$  es la reactancia de la línea y  $\delta$  es la diferencia de fases de  $U_1$  y  $U_2$ .

Por tanto, cuando el  $\sin \delta$  sea igual a 1 ( $\delta = 90^\circ$ ) la transferencia de potencia será máxima:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{U_1 * U_2}{X_L} \quad (3)$$

La reactancia  $X_L$  se define como:

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (3)$$

Como vemos, la reactancia es directamente proporcional a la longitud de la línea de transmisión. A mayor longitud, mayor reactancia y por tanto menor transferencia de potencia.

Por otro lado, en un sistema HVDC, la estabilidad no depende de la longitud de la línea, por lo que la potencia transferida siempre es constante y máxima:

$$P = P_{m\acute{a}x} = U * I \quad (4)$$

En resumen, la capacidad de transmisión de potencia en CA se ve limitada por la diferencia de fase entre las tensiones de los dos extremos y por la longitud de las líneas. En cambio, en CC la potencia no se ve afectada por ninguno de estos factores.

- **Compensación de líneas y corrientes de cortocircuito:** Para mantener la tensión deseada en la línea, es necesario un control del flujo de potencia reactiva. En sistemas de transmisión HVAC se utilizan baterías de condensadores para realizar la compensación de reactiva necesaria. Además, a mayor longitud, más compensación de potencia reactiva es requerida por las líneas.

En sistemas de transmisión HVDC esta compensación no es necesaria ya que los propios convertidores CA/CC y CC/CA del sistema controlan la potencia reactiva y en CC no existe la potencia reactiva. Por otro lado, esta compensación de potencia reactiva provoca corrientes de cortocircuito al final de las líneas de alterna. Ésta es otra ventaja más añadida a los sistemas HVDC ya que, al no necesitar dicha compensación, tampoco presentarán corrientes de cortocircuito.

- **Control de potencia activa:** Gracias a los avances en la electrónica de potencia, los controladores de los proyectos HVDC permiten un control del flujo de potencia activa rápido, preciso y seguro.

### **5.1.2 Consideraciones medioambientales**

También hay que tener en cuenta las consideraciones medioambientales para distinguir entre las dos tecnologías.

Por un lado, los sistemas HVDC tienen menos impacto visual que los sistemas HVAC. En continua son necesarios dos conductores, mientras que en los sistemas de alterna son necesarios tres. Esto significa que se utilizan menos líneas de transmisión y por tanto se requiere ocupar menos terreno para las líneas. Las torres de alterna han de ser más grandes que las de continua debido a la mayor cantidad de líneas.

Además hay que tener en cuenta la aparición del efecto corona por las líneas de transmisión. El aire que rodea las líneas de alto voltaje puede estar suficientemente cargado como para ionizar el fluido que rodea el conductor de la línea. Si llega a ocurrir, aparece un halo luminoso, que son pequeñas chispas o descargas alrededor del conductor. Este fenómeno puede provocar interferencias de radiofrecuencia, generación de ozono y óxidos de nitrógeno y ruido.

El efecto corona se manifiesta más en sistemas HVAC que en HVDC, por lo que los proyectos en continua, respetan más al medioambiente en este punto.

El campo magnético producido alrededor de las líneas eléctricas es muy parecido al producido naturalmente por el planeta, por lo que no es un aspecto determinante en ninguna de las dos tecnologías.

Los argumentos anteriores muestran que la tecnología HVDC es menos perjudicial para el medioambiente que la tecnología HVAC.

### **5.1.3 Consideraciones económicas**

El coste del proyecto es un aspecto muy importante a la hora de decidir si se realiza utilizando tecnología HVAC o HVDC.

Una manera de analizar esta variable es calculando los costes en directos e indirectos de cada proyecto y hacer un cómputo final para ver cuál de los dos es más rentable.

**Costes directos:**

Un sistema HVDC requiere de dos convertidores, un rectificador para convertir la tensión de CA a CC y un inversor para convertirla de CC a CA. El precio de dichos convertidores es muy elevado por lo que esto provoca una diferencia muy grande de coste inicial respecto a un sistema HVAC.

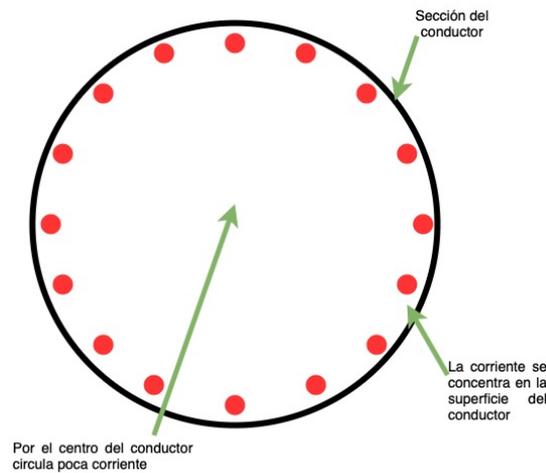
Por otro lado, las líneas de transporte en CC requieren de dos conductores, mientras que las de CA necesitan 3 conductores. Por lo que, para transmitir la misma potencia, un proyecto en HVAC requiere de un 33% más de líneas que un proyecto en HVDC.

Aun así, los costes de los convertidores son mucho más significantes y es por eso que los costes directos de una instalación HVDC son mayores que los de una instalación HVAC.

**Costes indirectos:**

Los costes indirectos son las pérdidas que se producen a lo largo de las líneas de transmisión. Estas pérdidas son superiores en CA que en CC:

En continua no existe el efecto pelicular, solamente aparece en las líneas de CA. Este efecto consiste en que cuando la corriente fluye por las líneas de alterna, no se distribuye uniformemente por el conductor si no que se concentra por la superficie de la sección. Esto significa que la sección por la que fluye la corriente es menor y como consecuencia provoca un aumento en la resistencia del conductor, por tanto las pérdidas son mayores. Además, a mayor frecuencia, más se intensifica este fenómeno y más grandes son las pérdidas.



**Figura 2: Efecto pelicular.**

Por tanto, se deduce que los costes directos son mayores en los sistemas de transmisión en HVDC. En cambio los costes indirectos son mayores en los sistemas HVAC.

Para analizar cuál de los dos proyectos es más viable económicamente se calculan los costes en función de la distancia de transmisión de la energía eléctrica. Para distancias cortas es más rentable el sistema HVAC ya que la inversión inicial es mucho menor. En cambio, para distancias suficientemente grandes, sale más rentable un sistema HVDC ya que los elevados costes iniciales se ven compensados por las pocas pérdidas capitalizadas a lo largo de las líneas de transmisión.

Existe un punto de equilibrio donde, para una determinada longitud, los costes del proyecto utilizando tecnología HVDC serían los mismos que utilizando tecnología HVAC. A esta distancia se la denomina longitud crítica.

Para longitudes inferiores a la longitud crítica es económicamente más viable realizar el proyecto en HVAC. Por otro lado, para distancias superiores a la longitud crítica son más rentables los proyectos en HVDC.

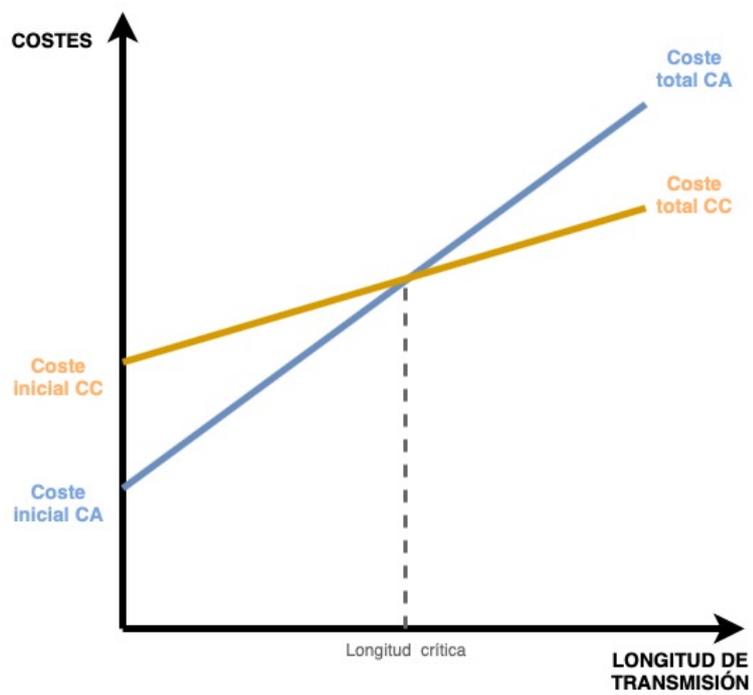


Figura 3: Comparativa costes HVDC/HVAC en función de la distancia.

## 5.2 Tecnologías HVDC

Gracias a los avances en la electrónica de potencia y a la mejora de los cables de transmisión, los sistemas HVDC han ido evolucionando a lo largo de los años.

Actualmente existen dos tecnologías principales en las que se dividen dichos sistemas: la tecnología Convencional o LCC-HVDC y la tecnología VSC-HVDC.

### 5.2.1 LCC-HVDC

La tecnología LCC es la tecnología utilizada convencionalmente en los sistemas de transmisión energética HVDC. Existen una gran cantidad de proyectos de transmisión energética que aplican esta tecnología a lo largo de todo el mundo. Dicha tecnología se caracteriza por utilizar tiristores como convertidores de potencia.

Los tiristores son dispositivos electrónicos formados por elementos semiconductores utilizados en la electrónica de potencia. Permiten conmutar entre dos estados de funcionamiento: conducción y bloqueo.

Los tiristores más comunes son los SCR (Silicon Controller Rectifier) y, como se ve en la Figura 4, presentan 3 terminales:

- Ánodo (A), que actúa como terminal principal.
- Puerta (G), que actúa como terminal de control.
- Cátodo (K), que actúa tanto como terminal principal como de control.

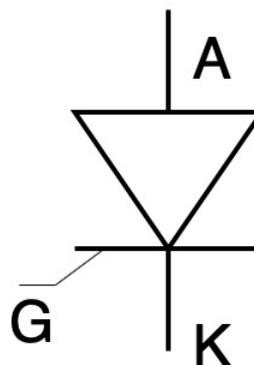


Figura 4: Tiristor

Los tiristores SCR están controlados por corriente, es decir, cuando se aplica una corriente al terminal G (Puerta) el tiristor se activa y permite la conducción.

Además, son dispositivos unidireccionales, ya que solamente permiten que la corriente circule en un sentido: de ánodo a cátodo. Es por eso que cuando es necesario cambiar el sentido del flujo de potencia en un sistema LCC-HVDC, hay que invertir la polaridad de la tensión de CC.

Tienen el inconveniente de que solamente se puede controlar el encendido del dispositivo y no su corte, por lo que solamente se puede controlar la potencia activa y no la reactiva.

Es por eso que la tecnología LCC, basada en tiristores, requiere la presencia de compensadores estáticos o de bancos de condensadores para compensar la potencia reactiva requerida por el sistema de transmisión, sobretodo en líneas muy largas ya que la caída de tensión puede ser muy elevada.

Esto supone una desventaja frente a la tecnología VSC ya que los compensadores estáticos y los bancos de condensadores requieren un mayor tamaño de la subestación.

Por otro lado, los sistemas LCC-HVDC tienen menos pérdidas que los sistemas VSC-HVDC.

Los convertidores LCC generan armónicos que necesitan ser filtrados, por lo que esta tecnología necesitará filtros en sus subestaciones y esto también contribuye a que su tamaño sea mayor.

#### **5.2.1.1 Elementos de un sistema LCC-HVDC**

Como podemos ver en la Figura 5, los sistemas HVDC-LCC presentan los siguientes componentes:

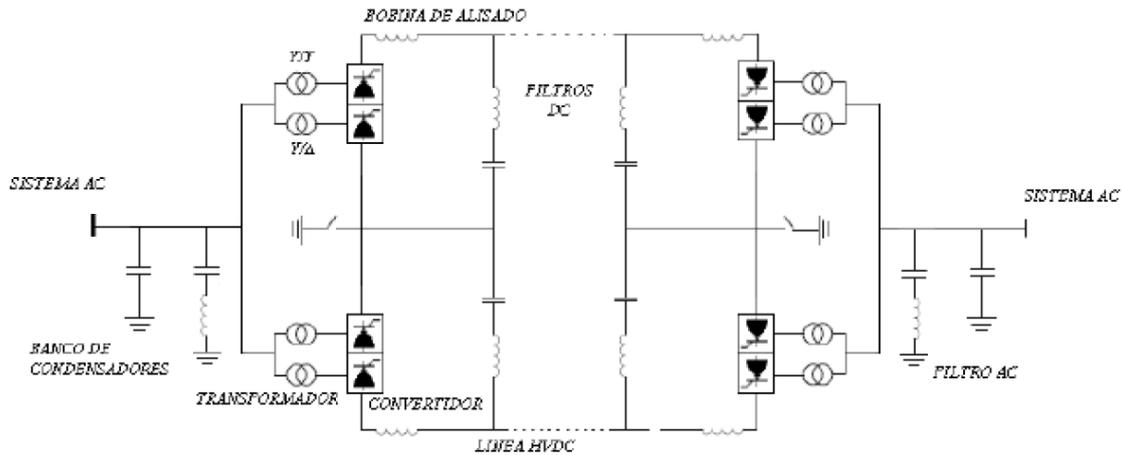


Figura 5: Esquema de un sistema LCC-HVDC [5].

- Bancos de condensadores: Los bancos de condensadores se encargan de compensar la potencia reactiva requerida por el sistema de transmisión.
- Transformadores: Se encuentran en el lado de CA y su función es adecuar la tensión a los niveles que requiere el convertidor.
- Convertidores: Se encuentran entre el lado de CA y el de CC. Como se ha explicado anteriormente, están formados por tiristores y realizan la función de rectificadores y de inversores.
- Filtros CC: Se sitúan en el lado de CC a la salida del rectificador y sirven para atenuar el rizado presente en las líneas de CC. Este rizado puede provocar interferencias en las telecomunicaciones por lo que es importante reducirlo. En las configuraciones back-to-back estos filtros no son necesarios.
- Bobina de choque: Se encuentran en las líneas de CC conectadas en serie. Es una reactancia inductiva y sirve para reducir las corrientes armónicas del sistema y mejorar su estabilidad.
- Filtros AC: Se sitúan entre los transformadores de los inversores y los transformadores de los rectificadores. Estos filtros se encargan de reducir los armónicos producidos durante la conversión y además, al igual que los bancos de condensadores, proporcionan potencia reactiva al sistema.
- Cables de CC: Los cables de CC en los sistemas de transmisión LCC-HVDC son distintos si la transmisión es aérea o submarina. Las configuraciones back-to-back no necesitan cables ya que los dos convertidores se encuentran en la misma estación y por tanto no requieren de líneas de transmisión.

### 5.2.2 VSC-HVDC

La alternativa a los sistemas LCC-HVDC es la tecnología VSC que ofrece otras ventajas importantes a la tecnología en los sistemas HVDC. Está basada en convertidores VSC formados por transistores IGBT.

Los transistores bipolares de puerta asilada (IGBT) son dispositivos electrónicos semiconductores que se utilizan en la electrónica de potencia como dispositivos de conmutación. Estos dispositivos permiten controlar altas potencias a altas frecuencias de conmutación.

Están constituidos por la combinación de un BJT (Bipolar Junction transistor) y un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), ver Figura 6 y Figura 7 **Error! Reference source not found.**

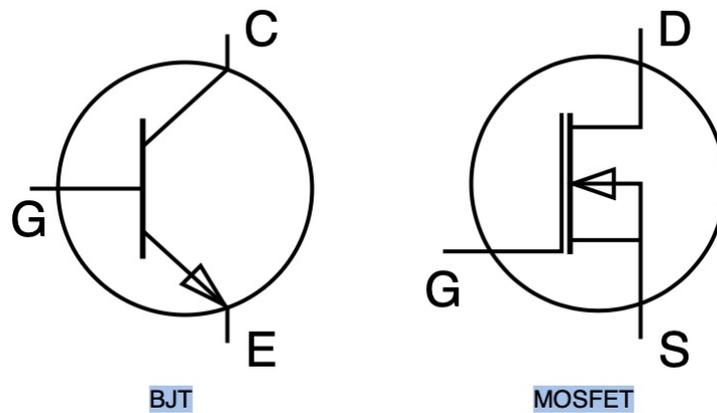


Figura 6: Transistores BJT y MOSFET (C=D, E=S)

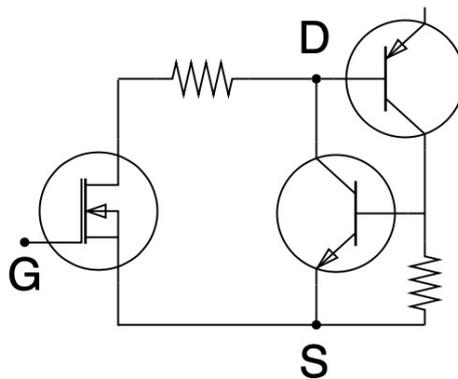


Figura 7: Transistor IGBT

El transistor IGBT presenta 3 terminales:

- Drenador (D), que actúa como terminal principal. También se le llama colector (C).

- Puerta (G), que actúa como terminal de control.
- Surtidor (S), que actúa tanto como terminal principal como de control. También se le llama emisor (E).

Al igual que los tiristores, presentan dos estados de funcionamiento: conducción y bloqueo.

Por otro lado, los transistores IGBT son controlados por tensión y no por corriente como los tiristores.

Esta tensión de control es la tensión  $V_{GS}$  (o  $V_{GE}$ ), tensión entre la puerta y el surtidor del transistor, y permite controlar tanto el encendido como el corte del transistor, por lo que, es posible controlar tanto la potencia reactiva como la potencia activa de forma independiente sin necesidad de compensadores estáticos ni de bancos de condensadores como en la tecnología LCC.

Por otro lado, la inversión del flujo de potencia se realiza mediante la inversión del flujo de corriente.

Esta tecnología presenta pocos armónicos por lo que no es necesario la presencia de filtros para eliminarlos en las subestaciones y por tanto éstas no requieren de tanto espacio. Por el contrario, si que se necesita un filtrado de las corriente de frecuencias próximas a las de conmutación de los IGBTs.

El principal inconveniente de los VSCs es que presentan muchas pérdidas.

### 5.2.2.1 Elementos de un sistema VSC-HVDC

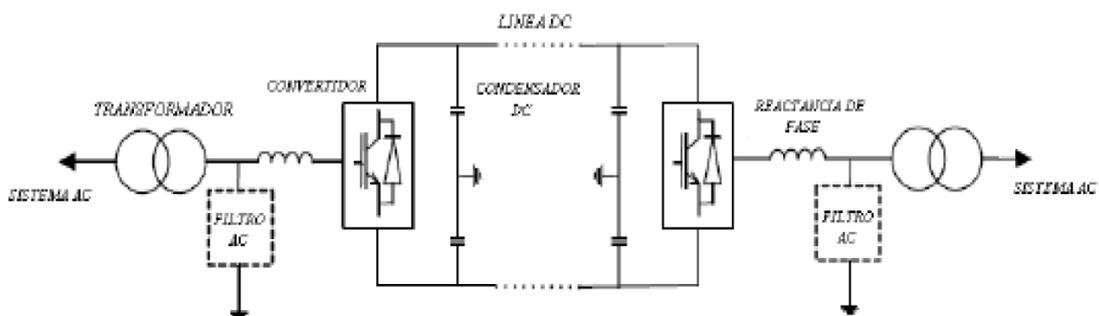


Figura 8: Esquema de un sistema VSC-HVDC [5].

En la figura anterior podemos ver el esquema de un sistema de transmisión VSC-HVDC. Sus componentes principales son:

- Transformadores: Se encuentran en el lado de CA antes del rectificador y su función es adecuar la tensión a los niveles que requiere el convertidor.
- Convertidores: Se encuentran tanto en el lado de CA como en el de CC. Como se ha explicado anteriormente, están formados por IGBTs y realizan la función de rectificadores y de inversores.
- Reactancia de fase: Se colocan antes del rectificador y después del inversor. Sirven para eliminar los armónicos de corriente que aparecen debido a las conversiones. También tienen la función de controlar tanto la potencia activa como la reactiva.
- Filtros de AC: Se colocan antes y después de las líneas de CC. Se encargan de eliminar los armónicos producidos por los IGBTs durante su funcionamiento. Estos armónicos pueden producir interferencias en equipos de radio y telecomunicación cercanos por lo que es muy importante atenuarlos.
- Filtros de CC: Se colocan en el lado de CC y están formados por condensadores. Sirven para minimizar el rizo presente en las líneas de CC y evitar posibles interferencias en las telecomunicaciones.
- Cables de CC: Los cables de transmisión en el lado de continua de los sistemas VSC-HVDC están hechos de un material especial. Este material es un polímero que presenta unas determinadas propiedades que le hacen especialmente interesante para estos sistemas de transmisión. Este polímero se caracteriza por ser muy ligero, flexible y tener unas condiciones mecánicas adecuadas. Las configuraciones back-to-back no necesitan cables ya que los dos convertidores se encuentran en la misma estación y por tanto no requieren de líneas de transmisión.

## 5.3 Configuraciones HVDC

Existen diferentes configuraciones en los sistemas de transmisión HVDC.

### 5.3.1 Configuración back-to-back

En esta configuración, los dos convertidores se encuentran en la misma estación transformadora, por lo que no son necesarias líneas de transmisión.

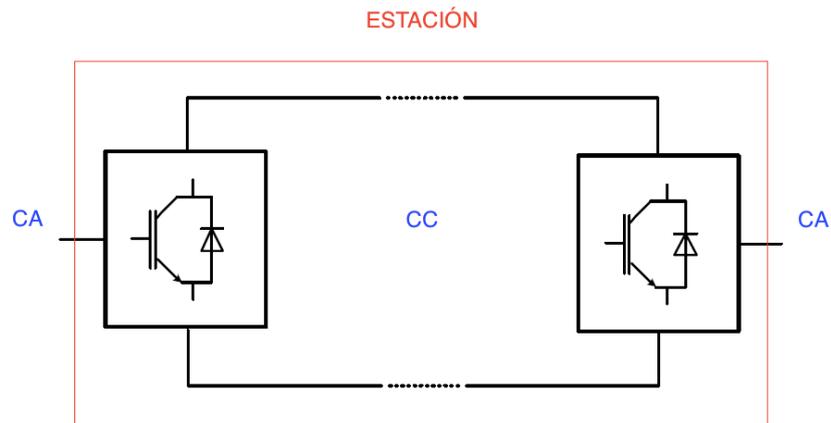


Figura 9: Configuración back-to-back [6].

### 5.3.2 Configuración punto a punto

La configuración punto a punto es la más común. El rectificador y el inversor se encuentran en dos estaciones transformadoras distintas por lo que en este caso es necesaria una línea de transmisión de CC.

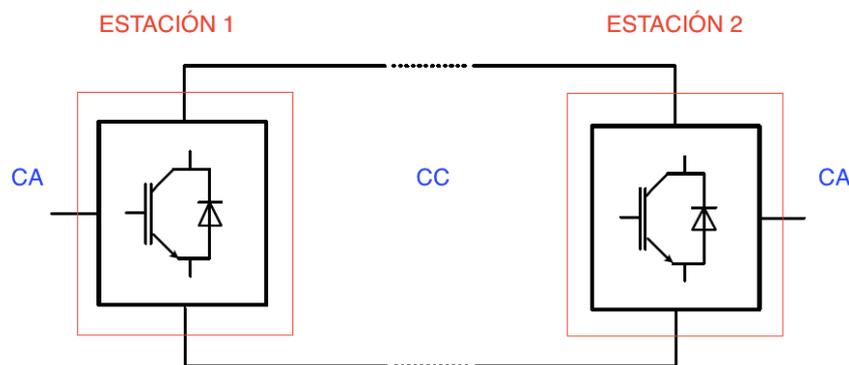


Figura 10: Configuración punto a punto [6].

### 5.3.3 Configuración Multiterminal

Una configuración multiterminal consta de, como mínimo, tres estaciones transformadoras. Estas estaciones están unidas entre ellas por líneas de transmisión de CC. Existen tres tipos de conexión en la configuración multiterminal:

- **Multiterminal Serie:** Todas las estaciones transformadoras están conectadas a una tensión diferente. Al estar conectadas en serie entre

si, una caída de tensión en cualquiera de las estaciones afectaría a la tensión total del proyecto.

- **Multiterminal Paralela:** Las estaciones están conectadas entre si en paralelo y por tanto todas están conectadas a la misma tensión. Se utiliza este tipo de conexión cuando las estaciones transformadoras superan el 10% de la potencia total de las estaciones rectificadoras [7].
- **Multiterminal Mixta:** Las conexiones mixtas son aquellas en las que cada estación transformadora puede conectarse tanto en serie como en paralelo, independientemente de cómo estén conectadas el resto.

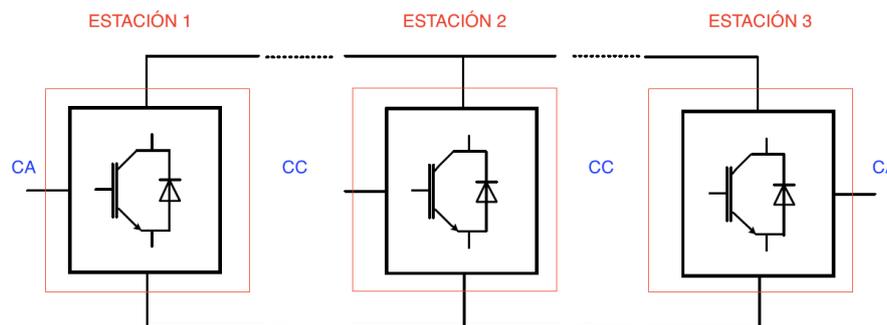


Figura 11: Configuración Multiterminal [6].

### 5.3.4 Configuración Unitaria

Esta configuración es utilizada en proyectos donde la transmisión se realiza en continua desde el punto de generación de energía.

Se utiliza principalmente en centrales hidroeléctricas o eólicas, donde las turbinas producen suficiente potencia a transmitir. Una de las ventajas de esta configuración es que como el enlace se hace en continua, la frecuencia no influye en el sistema por lo que no importa si la generación de alterna se realiza a una frecuencia de 50 o de 60 Hz [7].

## 5.4 Modos de transmisión HVDC

### 5.4.1 Conexión monopolar

Las estaciones transformadoras de un sistema con conexión monopolar están unidas entre si por un único cable de transmisión. El retorno se realiza a través de los electrodos de las estaciones transformadoras conectándolas a tierra o, si se trata de una conexión submarina, a mar.

Además, el cable de transmisión suele presentar polaridad negativa ya que así el efecto corona es menor.

La conexión monopolar es la conexión más simple y económica ya que no es necesaria la instalación de un cable de retorno.

Esta conexión es la más utilizada en proyectos con distancias muy largas y en proyectos submarinos.

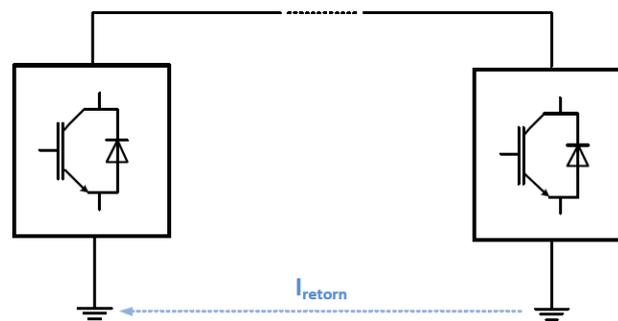


Figura 12: Esquema conexión monopolar [6].

#### 5.4.2 Conexión bipolar

A diferencia de la conexión monopolar, en una conexión bipolar las estaciones están conectadas entre sí por dos cables de transmisión. Un cable presenta polaridad positiva y el otro polaridad negativa. Básicamente se trata de dos conexiones monopolares independientes que transmiten la misma potencia simultáneamente.

Una de las principales ventajas de este tipo de conexión es que si alguna línea falla la otra puede seguir transmitiendo energía.

La capacidad de transmisión de potencia es mayor que en los enlaces monopolares, por lo que este tipo de conexiones se utilizan en sistemas donde la potencia requerida elevada.

La conexión bipolar es la más utilizada, sobretodo en proyectos dónde las líneas de transmisión son aéreas.

El retorno puede realizarse por tierra, a través de un conductor o puede no haber retorno.

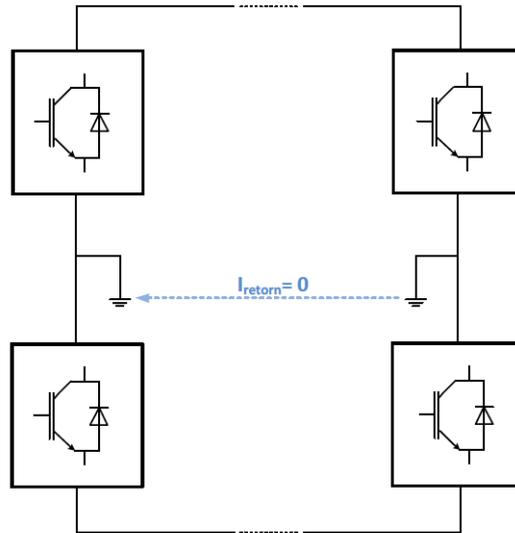


Figura 13: Esquema conexión bipolar [6].

### 5.4.3 Conexión homopolar

En una conexión homopolar, las estaciones transformadoras están unidas por dos o más cables conductores que presentan polaridad negativa.

La principal ventaja es que el efecto corona se reduce y por tanto las pérdidas y sus consecuencias medioambientales se ven atenuadas. Por otro lado, el gran inconveniente de esta conexión es que la corriente que circula por el cable de retorno es elevada. Esto implica que se requiera un cable de retorno más caro.

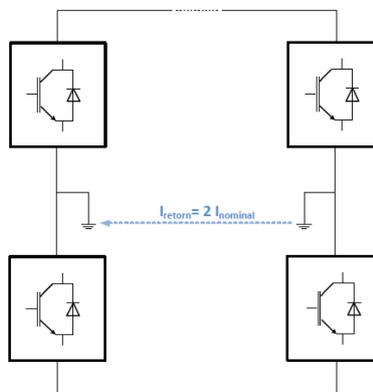


Figura 14: Esquema conexión homopolar [6].

## 6. Estudio proyectos HVDC en el mundo

Existen alrededor de 180 proyectos HVDC en el mundo que están en funcionamiento o en construcción. Cada vez se realizan más proyectos utilizando la tecnología HVDC por lo que poder acceder a la información de los proyectos ya existentes puede ser de gran utilidad. Es por eso que se ha realizado una búsqueda exhaustiva de información sobre todos los proyectos HVDC existentes alrededor del mundo. A partir de la información recogida se ha realizado una base de datos y un análisis estadístico.

### 6.1 Base de datos

Uno de los objetivos de este trabajo es la realización de una base de datos que nos permita visualizar de manera rápida y sencilla la información técnica de cualquier proyecto HVDC del mundo.

Para eso se realizó una búsqueda completa de información, se creó una lista con todos los proyectos existentes actualmente y se recopiló la información más importante de todos los proyectos.

Dicha información es:

- Nombre del proyecto HVDC
- Ubicación de cada una de las estaciones del proyecto.
- Año de puesta en marcha o año previsto de puesta en marcha si el proyecto aún está en construcción.
- Capacidad de transmisión de potencia (MW)
- Voltage AC (kV)
- Voltage DC (kV)
- Longitud total de las líneas de transmisión (km)
- Longitud líneas submarinas (km)
- Longitud líneas aéreas (km)
- Longitud líneas subterráneas (km)
- Tipo de proyecto (punto a punto, back-to-back o multiterminal)
- Proveedores durante la construcción del proyecto
- Referencias. Se ha añadido también el link de las referencias de dónde se han extraído los datos para consultar más información de interés si se requiere.

### 6.1.1 MATLAB

Se ha utilizado el programa MATLAB para la realización de esta base de datos.

Se ha creado un código en el editor de MATLAB que importa los datos de los proyectos previamente recopilados en un Excel y los introduce en una matriz. De esta manera el programa es capaz de recorrer todos los datos y buscar los datos que se pidan a la hora de ejecutar el programa.

Cuando se ejecuta el programa aparece una imagen de una línea de transmisión junto con una ventana en la que debemos escribir el país del que queremos conocer la información.

Para que el programa funcione con éxito, debemos introducir el nombre del país con la primera letra en mayúsculas y el resto en minúsculas ya que así es como se ha registrado la información.

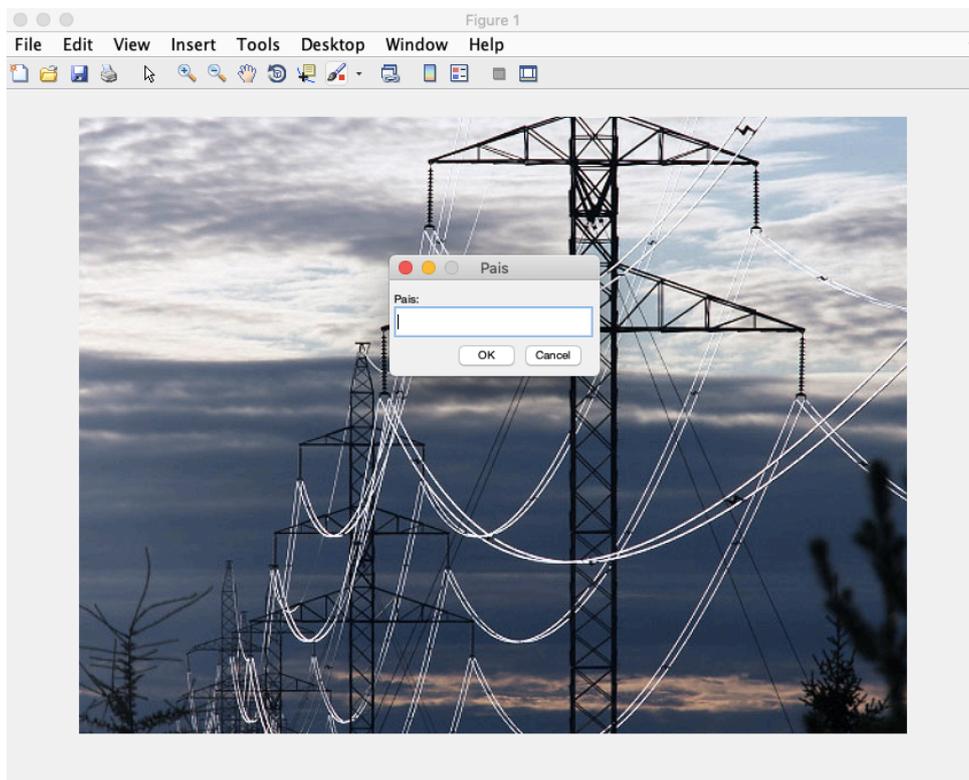


Figura 15: Ventana que aparece cuándo se ejecuta el programa.

Al introducir el país, el programa recorre la matriz y busca todos los proyectos que tengan al menos una estación en dicho país. Si existe algún proyecto en el país, aparece otra ventana con el listado de todos los proyectos.

En la siguiente figura se puede un ejemplo. Si introducimos 'Canadá' en la primera ventana, aparece una segunda con un total de 14 nombres de proyectos. Además aparece una segunda ventana en la que debemos escribir el nombre del proyecto del que queremos conocer la información.

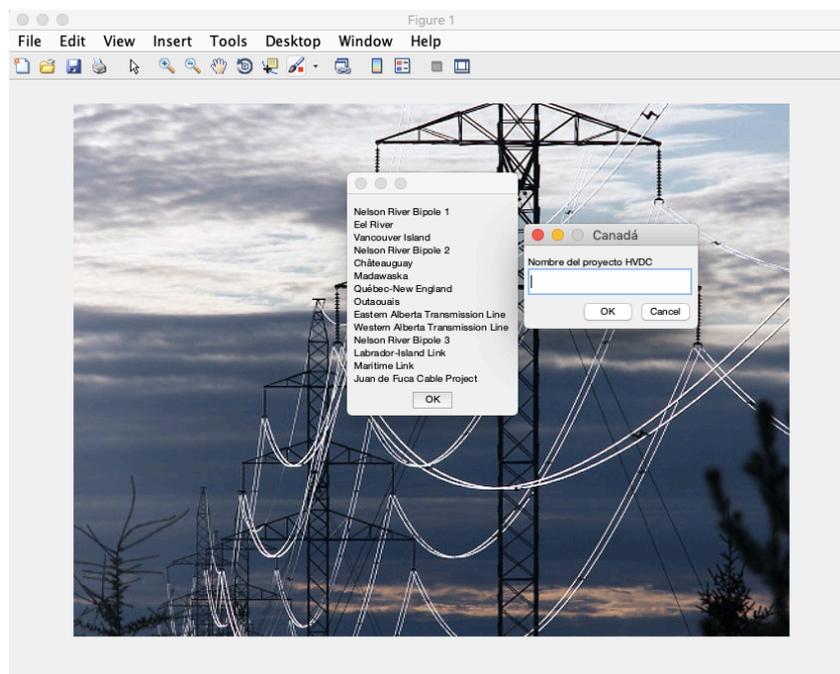


Figura 16: Listado de proyectos HVDC existentes en Canadá.

Si introducimos en la segunda ventana el nombre de uno de los proyectos que nos han aparecido, aparecerá toda la información técnica de dicho proyecto HVDC. Hay que tener en cuenta que si no se escribe el nombre del proyecto exactamente igual que cómo aparece en el listado, el programa no nos dará la información.

En la siguiente imagen vemos la información que aparece si buscamos el proyecto 'Nelson River Bipole 1'.

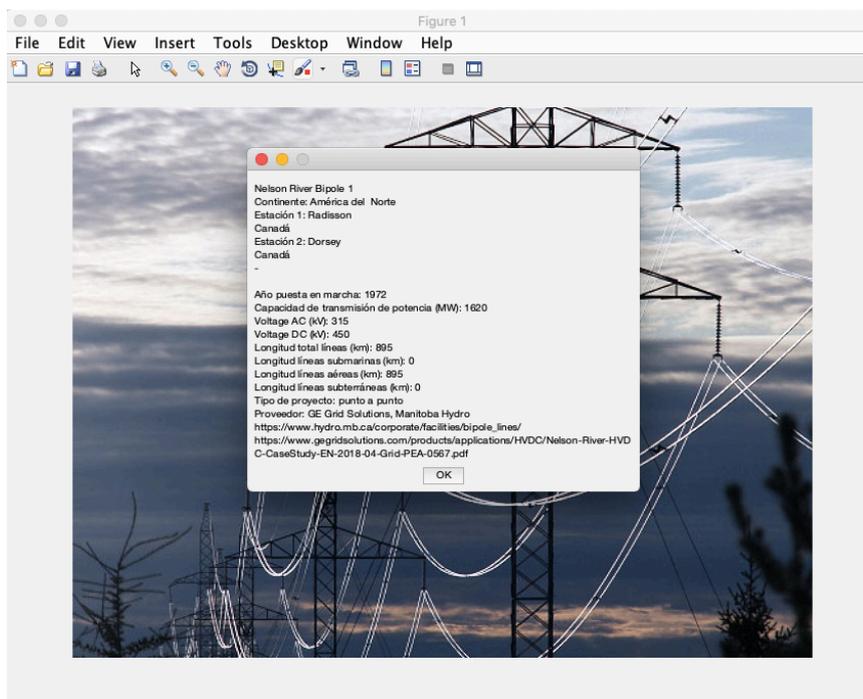


Figura 17: Información técnica del proyecto HVDC 'Nelson River Bipole 1'.

Si escribimos el nombre del país incorrectamente, o si no existen proyectos en el país que solicitamos, aparece una ventana indicando que no existen proyectos en ese país.

En la siguiente imagen se puede ver lo comentado si buscamos proyectos en Tanzania.

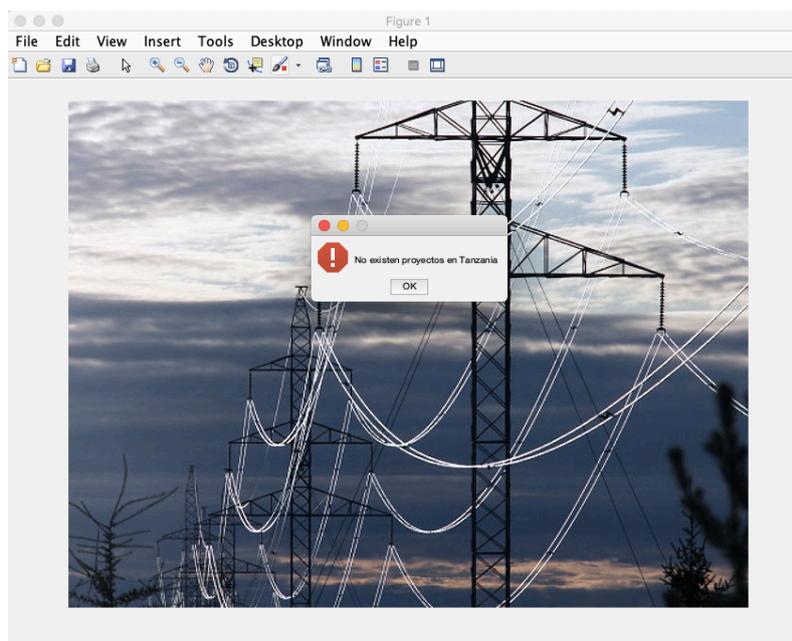


Figura 18: Mensaje que aparece si buscamos 'Tanzania' en la base de datos.

En la siguiente figura se puede ver el mensaje que aparece en la base de datos si se escribe incorrectamente el nombre de un proyecto. En este ejemplo se ha escrito 'Nelson River Bipole 123' cuando debería ser 'Nelson River Bipole 1'.

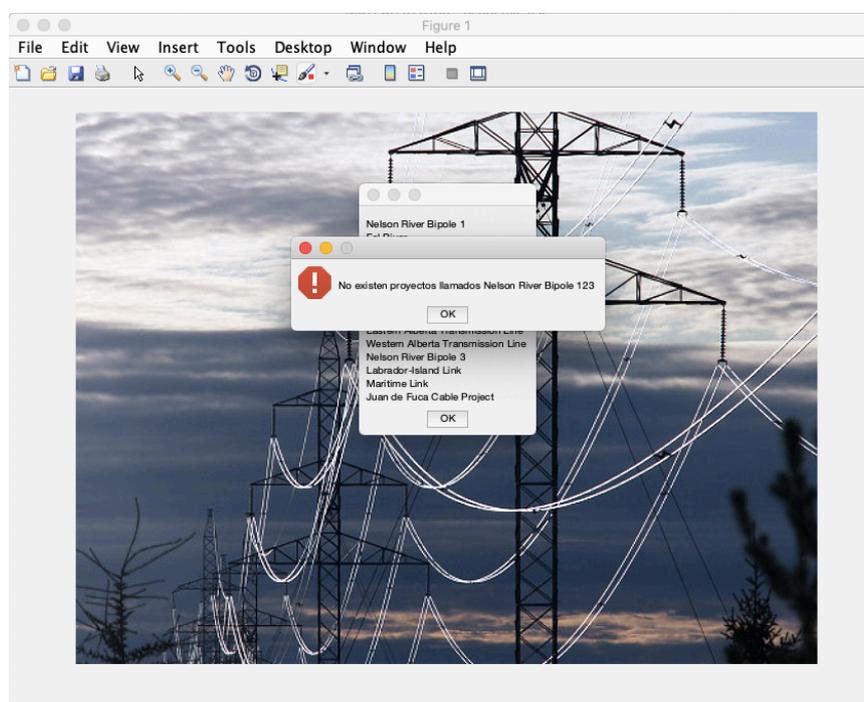


Figura 19: Mensaje que aparece si escribimos mal el nombre de un proyecto.

## 6.2 Proyectos a destacar

Gracias a la elaboración de la base de datos se han podido seleccionar algunos proyectos que destacan por ser pioneros en algún aspecto o destacar por sus dimensiones.

- **Primer proyecto HVDC:** Gotland 1, año 1954, 20 MW,  $\pm 100$  kV (CC), 103 km, punto a punto.
- **Mayor capacidad de transmisión de potencia:** Jinping – Sunan, año 2013, **7200 MW**,  $\pm 800$  kV (CC), 2090 km, punto a punto.
- **Primer proyecto back-to-back:** Eel River, año 1972, 350 MW,  $\pm 80$  kV (CC), **back-to-back**.
- **Primer proyecto multiterminal:** Québec – New England, año 1990, 2000 MW,  $\pm 450$  kV (CC), 1480 km, **multiterminal**.
- **Líneas de transmisión más largas:** Rio Madeira Link, año 2013, 6300 MW,  $\pm 600$  kV (CC), **2375 km**, punto a punto.

- **Líneas submarinas de mayor longitud:** NorNed, año 2008, 700 MW,  $\pm 450$  kV (CC), **580 km (submarinas)**, punto a punto.
- **Líneas subterráneas de mayor longitud:** Murraylink, año 2002, 220 MW,  $\pm 150$  kV, **180 km (subterráneas)**, punto a punto.

Cabe destacar que se han seleccionado los proyectos que están en funcionamiento y no se han tenido en cuenta los proyectos en construcción para realizar este apartado.

## 6.3 Proyectos en España

Actualmente existen dos proyectos HVDC en España: El proyecto Cometa, entre Valencia y Mallorca; y el proyecto Inelfe, que conecta Baixas (Francia) con el norte de la península.

### 6.3.1 Cometa

La isla de Mallorca, la más grande del archipiélago Balear, es un destino muy estimado por los turistas de todo el mundo. Cada año acoge a unos 10 millones de turistas, hecho que la convierte en una de las regiones turísticas más populares de España.

Todo eso acarrea una demanda energética muy grande que va aumentando anualmente sin descanso. Es por eso que es necesario una red energética potente y de calidad que permita cubrir la demanda con seguridad.

Con el fin de cubrir esta necesidad energética, en el año 2007 nace el primer proyecto HVDC en España, el proyecto Rómulo, también conocido como Cometa. Ese año, Red Eléctrica de España (REE) firmó el contrato con Siemens para la construcción del proyecto. El proyecto fue puesto en servicio a finales del 2011.

El sistema presenta una configuración punto a punto ya que la interconexión se realiza entre dos estaciones transformadoras. Éstas se encargan de transformar la corriente alterna en continua antes de realizarse el transporte. La primera estación está situada en Morvedre, Valencia y trabaja a un voltaje de CA de 400 kv. La segunda estación se encuentra en Santa Ponsa, Mallorca y trabaja a un voltaje de CA de 220 kv.



Figura 20: Interconexión Valencia-Mallorca [8].

Se trata de una conexión submarina de 237 kilómetros de longitud y presenta una profundidad máxima de 1.485 metros. La capacidad de transmisión de potencia de las líneas submarinas del proyecto Cometa es de 200 MW trabajando a un voltaje en CC de 250 kv.

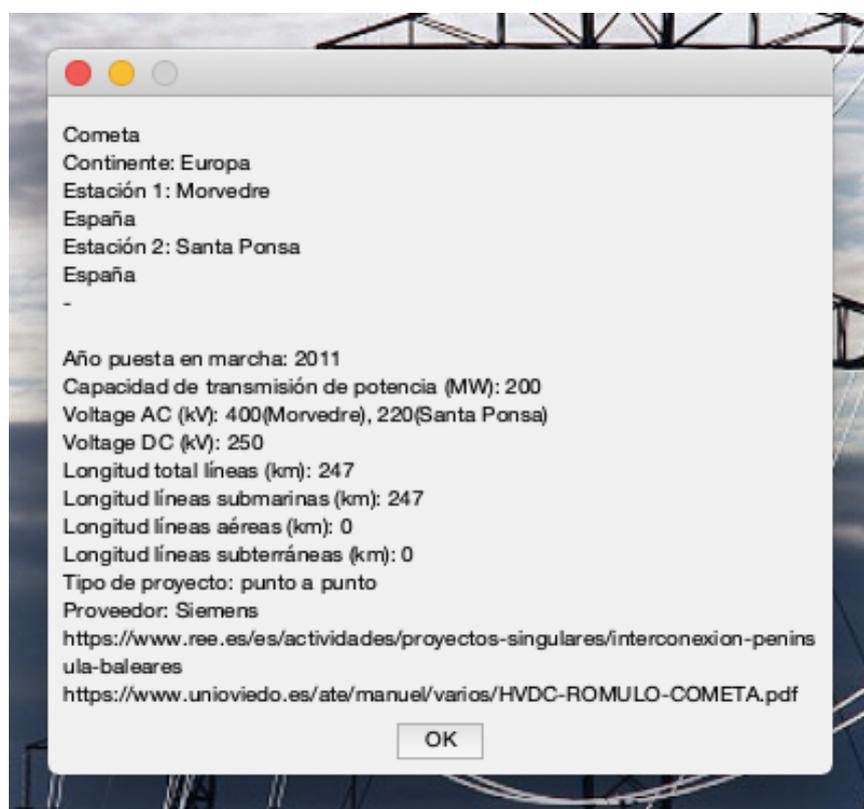


Figura 21: Información técnica del proyecto HVDC 'Cometa'.

La creación de este proyecto supuso a REE su mayor inversión hasta ahora en un único proyecto, habiéndole costado 420 millones de euros [9]. Sin duda esta interconexión ha sido fundamental para proporcionar una red energética segura y de calidad a las islas Baleares.

### **6.3.2 Inelfe**

Poco después de que se iniciara el proyecto Rómulo, en el año 2008, REE firmó otro acuerdo con la RTE (Réseau de Transport d'Électricité, en francés) para crear Inelfe. El objetivo era crear una interconexión HVDC entre el sur de Francia y España que pasara por los pirineos. El proveedor del proyecto Inelfe también era Siemens.

Además de garantizar un suministro energético de calidad, seguro y estable, esta interconexión es pionera en potencia. Gracias a ella, España y Francia duplicaron su capacidad de intercambio de potencia, de 1400 MW a 2800 MW.

Al igual que el proyecto Cometa, la interconexión entre España y Francia presenta una configuración punto a punto ya que consta de dos estaciones transformadoras. Una de las estaciones se ubica en Baixas, Francia y la otra estación se encuentra en Santa Llogaia (España). Las dos trabajan a un voltaje de CA de 400 kv.

Las líneas de transmisión son subterráneas y recorren una distancia de 64,5 km. Transmiten un flujo de potencia de 2000 MW trabajando a un voltaje de continua de 320 kv.



Figura 22: Información técnica del proyecto HVDC 'Inelfe'.

## **6.4 Posibilidades de la base de datos**

A partir de la base de datos se puede extraer la información necesaria para realizar estudios de interés.

Una propuesta de estudio es un análisis estadístico de los sistemas de distribución HVDC en función de sus características. Estudiar las relaciones entre las diferentes variables presentes en la base de datos.

Cabe mencionar que uno de los objetivos de la realización del trabajo es que la información recopilada pueda utilizarse en futuras líneas de investigación sobre fenómenos como las resonancias en las instalaciones HVDC y los problemas de estabilidad en los enlaces de sus convertidores. Son los principales inconvenientes de la tecnología HVDC y es por eso es importante su estudio para conseguir minimizarlos y mejorar las instalaciones.

Además se propone realizar un análisis de optimización del suministro de potencia en enlaces HVDC.

La base de datos y el presente trabajo pueden ser de gran utilidad al agilizar la búsqueda de información requerida para la realización de los estudios propuestos.

## Conclusiones

En este trabajo se presenta una descripción general de los enlaces de HVDC, sus características principales y sus configuraciones habituales. Además se ha creado una base de datos que contiene la información técnica más relevante de todos los proyectos HVDC existentes en el mundo que están en funcionamiento o en construcción.

Actualmente la mayoría de proyectos de transmisión energética trabajan con tecnología HVAC pero los avances tecnológicos y la evolución de la electrónica de potencia hacen que la tecnología HVDC sea cada vez más rentable técnica, ambiental y económicamente. Además, los enlaces HVDC son claves para el desarrollo de las redes inteligentes del futuro.

Las grandes empresas eléctricas apuestan por esta tecnología e invierten en su estudio y desarrollo. Actualmente hay muchas interconexiones en construcción y muchos otros proyectos HVDC que tienen previsto ponerse en marcha próximamente.

Toda la información obtenida en este proyecto así como la base de datos, pueden ser utilizadas posteriormente para la realización de futuros estudios de investigación relacionados con las resonancias en la instalación HVDC y los posibles problemas de estabilidad en los enlaces con los convertidores HVDC. Además se propone como posible continuación de este proyecto un estudio de eficiencia de la distribución HVDC en función de sus características y un análisis de optimización del suministro de potencia en enlaces HVDC.

Para finalizar, recalcar que la búsqueda y estudio durante la realización del trabajo me han permitido introducirme en el mundo de la transmisión energética y conocer los proyectos existentes alrededor del mundo junto con sus características principales.

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer a Luis Sainz, tutor y director de este trabajo, su ayuda, orientación y dedicación han sido fundamentales para la realización del trabajo.

Agradecerles también a mis padres y hermanos, por su paciencia y apoyo a lo largo de toda la carrera.

## Bibliografía

- [1] Recursos Tic Educación. *Historia de la electricidad*. Fuente:  
[http://recursostic.educacion.es/eda/web/tic\\_2\\_0/informes/perez\\_freire\\_carlos/temas/personajes.htm](http://recursostic.educacion.es/eda/web/tic_2_0/informes/perez_freire_carlos/temas/personajes.htm)
- [2] European Commission. *Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática* [Archivo PDF]. Fuente:  
[https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key\\_messages\\_es.pdf](https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_es.pdf)
- [3] ABB. *HVDC References*. Fuente:  
<https://new.abb.com/systems/hvdc/references>.
- [4] ABB. *HVDC : una tecnología para la eficiencia energética y la fiabilidad de las redes* [Archivo PDF]. Fuente:  
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/56a27c94b60d6374c12574c6004e9268/\\$file/HVDC+-+efficiency+and+reliability\\_040908.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/56a27c94b60d6374c12574c6004e9268/$file/HVDC+-+efficiency+and+reliability_040908.pdf)
- [5] I. Rodríguez Freire, 2016. *Transporte de energía eléctrica por corriente continua* [Archivo PDF]. Fuente:  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9151/386942.pdf?>
- [6] M. Aragues, 2011 *Optimització del transport d'energia elèctrica en sistemes multiterminal HVDC per grans parcs eòlics marins* [Archivo PDF]. Fuente:  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13520/PFC\\_Monica\\_Aragues.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13520/PFC_Monica_Aragues.pdf)
- [7] A. González Santos, 2018. *Estudio de la transmisión de alta potencia alterna vs. continua* [Archivo PDF]. Fuente:  
[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21194/GonzálezSantos\\_Alejandro\\_TFG\\_2018.pdf](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21194/GonzálezSantos_Alejandro_TFG_2018.pdf)
- [8] Siemens. *The COMETA project. Energy for the Balearic Islands* [Archivo PDF]. Fuente:  
<https://www.unioviedo.es/ate/manuel/varios/HVDC-ROMULO-COMETA.pdf>
- [9] Red Eléctrica de España. *Proyectos singulares*. Fuente:  
<https://www.ree.es/es/actividades/proyectos-singulares>.