



**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**

**Escola Universitaria Politécnica**

**Grado en Ingeniería Eléctrica**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**TFG Nº: 770G02A171**

**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

**AUTOR: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**

**TUTORES: JOSÉ LUIS CASTELEIRO ROCA  
ESTEBAN JOVE PÉREZ**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: LOS TUTORES



**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **ÍNDICE**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



I	<b>ÍNDICE</b> . . . . .	3
	Contenidos del TFG . . . . .	5
	Listado de figuras . . . . .	7
II	<b>MEMORIA</b> . . . . .	9
	Índice del documento Memoria . . . . .	11
1	Objeto . . . . .	13
2	Alcance . . . . .	13
3	Antecedentes . . . . .	14
	3.1 Introducción a la Corriente Alterna . . . . .	14
	3.2 Generación de Corriente Alterna . . . . .	15
	3.2.1 Elementos generadores . . . . .	16
	3.2.2 Centrales eléctricas de corriente alterna . . . . .	17
	3.3 Pérdidas en un sistema HVAC . . . . .	20
	3.4 Consumo de Corriente Alterna . . . . .	25
4	Normas y referencias . . . . .	26
	4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas . . . . .	26
	4.2 Bibliografía . . . . .	27
	4.3 Otras referencias . . . . .	27
5	Definiciones y abreviaturas . . . . .	27
6	Requisitos de diseño . . . . .	29
7	Análisis de las soluciones . . . . .	29
	7.1 Introducción a la Corriente Continua . . . . .	29
	7.2 Funcionamiento básico de un sistema HVDC . . . . .	30
	7.2.1 Convertidores Eléctricos . . . . .	31
	7.2.2 Dispositivos de potencia . . . . .	32
	7.2.3 Tipo de conexiones . . . . .	36
	7.2.4 Tipo de configuraciones . . . . .	37
	7.2.5 Tipo de sistemas de conversión . . . . .	39
	7.3 Generación de Corriente Continua . . . . .	40
	7.3.1 Elementos de Generación y Almacenamiento . . . . .	41
	7.3.2 Centrales Eléctricas . . . . .	45
	7.4 Pérdidas en un sistema HVDC . . . . .	46
	7.5 Consumo en Corriente Continua . . . . .	47
8	Resultados finales . . . . .	48
	8.1 Aspecto Técnico . . . . .	48
	8.2 Aspecto Medioambiental . . . . .	51
	8.3 Aspecto económico . . . . .	52
	8.3.1 Costes directos de la instalación . . . . .	52
	8.3.2 Costes indirectos de la instalación . . . . .	54

9	Orden de prioridad entre los documentos . . . . .	55
III	<b>ANEXOS</b> . . . . .	57
	Índice del documento Anexos . . . . .	59
10	Asignación del Trabajo de Fin de Grado . . . . .	61
11	Cálculos de una Línea Aérea . . . . .	64
	11.1 Línea Aérea de Primera Categoría: 132 kV, 50 MW y 30 km . . . . .	64
	11.1.1 Corriente Alterna . . . . .	65
	11.1.2 Corriente Continua . . . . .	68
	11.2 Línea Aérea de Categoría Especial: 420 kV, 360 MW y 50 km . . . . .	69
	11.2.1 Corriente Alterna . . . . .	70
	11.2.2 Corriente Continua . . . . .	72
	11.3 Comparativa de datos obtenidos . . . . .	73
IV	<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b> . . . . .	75
	Índice del documento Pliego de condiciones . . . . .	77
12	Pliego de Condiciones . . . . .	79
V	<b>ESTADO DE MEDICIONES</b> . . . . .	81
	Índice del documento Estado de Mediciones . . . . .	83
13	Estado de Mediciones . . . . .	85
VI	<b>PRESUPUESTO</b> . . . . .	87
	Índice del documento Presupuesto . . . . .	89
14	Precios unitarios de mano de obra . . . . .	91

# Listado de figuras

1	Nikola Tesla, descubridor de la corriente alterna. . . . .	14
2	Onda senoidal de un generador bipolar de corriente alterna de inductor giratorio. . . . .	15
3	Partes básicas de un generador eléctrico. . . . .	16
4	Partes básicas de un grupo turbina-generador. . . . .	17
5	Disposición esquemática de una central hidroeléctrica. . . . .	18
6	Disposición esquemática de una central termoeléctrica convencional. . . . .	18
7	Disposición esquemática de una central nuclear PWR (Pressurized Water Reactor, Reactor de Agua a Presión). . . . .	19
8	Disposición esquemática de una central eólica. . . . .	20
9	Partes de una central solar fotovoltaica con heliostatos. . . . .	20
10	Estabilidad transitoria de una red HVAC. . . . .	21
11	Representación del método de transposición en una línea aérea. . . . .	22
12	Efecto Skin en un conductor de una línea de corriente continua (superior) y otro de una línea de corriente alterna (inferior). . . . .	23
13	Representación efecto Corona en una línea de transporte. . . . .	25
14	Representación esquemática de un transformador eléctrico. . . . .	26
15	Thomas Alva Edison, descubridor de la corriente continua. . . . .	30
16	Representación esquemática de una línea HVDC. . . . .	31
17	Representación de un diodo . . . . .	33
18	Representación de un transistor BJT (Bipolar Junction Transistor). . . . .	33
19	Representación de un transistor BJT y un transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Fiel Effect Transistor). Tipo N (izq.) y tipo P (drch.). . . . .	34
20	Representación de un transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). . . . .	35
21	Representación de un tiristor . . . . .	36
22	Representación de un tiristor GTO (Gate Turn-Off Thyristor). . . . .	36
23	Esquema básico de una línea HVDC con conexión monopolar con retorno por tierra. . . . .	37
24	Esquema básico de una línea HVDC con conexión bipolar. . . . .	37
25	Esquema básico de un línea HVDC con configuración back to back. . . . .	38
26	Esquema básico de un línea HVDC con configuración multiterminal. . . . .	38
27	Esquema básico de un línea HVDC VSC . . . . .	39
28	Esquema básico de un línea HVDC LCC . . . . .	40
29	Partes de una pila seca. . . . .	41
30	Partes de un acumulador. . . . .	42

31	Forma de onda a la salida del colector de delgas. . . . .	43
32	Representación esquemática de una dinamo con excitación en serie. . . . .	43
33	Representación esquemática de una dinamo con excitación compuesta corta (superior) y con excitación larga (inferior). . . . .	44
34	Representación esquemática de una dinamo. . . . .	45
35	Partes de una central solar fotovoltaica con células solares. . . . .	46
36	Esquema básico de una célula solar. . . . .	46
37	Representación de los apoyos típicos para líneas HVAC y HVDC. . . . .	47
38	Esquema básico de un elevador boost. . . . .	48
39	Esquema básico de un reductor buck. . . . .	48
40	Localización de la interconexión entre Argentina y Brasil . . . . .	49
41	Localización de la interconexión entre Noruega y Holanda . . . . .	50
42	Comparación de costes de un sistema HVAC frente a uno HVDC. . . . .	52
43	Representación gráfica de una estación convertidora clásica. . . . .	53
44	Localización geográfica línea de transmisión entre la central de As Pontes y Megasa S.L. . . . .	64
45	Leyenda tensiones nominales Red Eléctrica Española. . . . .	65
46	Características de conductores aéreos. . . . .	65
47	Circuito eléctrico equivalente de una línea de transmisión eléctrica en corriente alterna. . . . .	68
48	Localización geográfica línea de transmisión entre la central de As Pontes y la industria de Alcoa en San Ciprián, Lugo. . . . .	70

**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **MEMORIA**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



## Índice del documento MEMORIA

<b>1 Objeto</b>	<b>13</b>
<b>2 Alcance</b>	<b>13</b>
<b>3 Antecedentes</b>	<b>14</b>
3.1 Introducción a la Corriente Alterna . . . . .	14
3.2 Generación de Corriente Alterna . . . . .	15
3.2.1 Elementos generadores . . . . .	16
3.2.2 Centrales eléctricas de corriente alterna . . . . .	17
3.3 Pérdidas en un sistema HVAC . . . . .	20
3.4 Consumo de Corriente Alterna . . . . .	25
<b>4 Normas y referencias</b>	<b>26</b>
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas . . . . .	26
4.2 Bibliografía . . . . .	27
4.3 Otras referencias . . . . .	27
<b>5 Definiciones y abreviaturas</b>	<b>27</b>
<b>6 Requisitos de diseño</b>	<b>29</b>
<b>7 Análisis de las soluciones</b>	<b>29</b>
7.1 Introducción a la Corriente Continua . . . . .	29
7.2 Funcionamiento básico de un sistema HVDC . . . . .	30
7.2.1 Convertidores Eléctricos . . . . .	31
7.2.2 Dispositivos de potencia . . . . .	32
7.2.3 Tipo de conexiones . . . . .	36
7.2.4 Tipo de configuraciones . . . . .	37
7.2.5 Tipo de sistemas de conversión . . . . .	39
7.3 Generación de Corriente Continua . . . . .	40
7.3.1 Elementos de Generación y Almacenamiento . . . . .	41
7.3.2 Centrales Eléctricas . . . . .	45
7.4 Pérdidas en un sistema HVDC . . . . .	46
7.5 Consumo en Corriente Continua . . . . .	47
<b>8 Resultados finales</b>	<b>48</b>
8.1 Aspecto Técnico . . . . .	48
8.2 Aspecto Medioambiental . . . . .	51
8.3 Aspecto económico . . . . .	52
8.3.1 Costes directos de la instalación . . . . .	52
8.3.2 Costes indirectos de la instalación . . . . .	54

**9 Orden de prioridad entre los documentos**

**55**

# 1 Objeto

El presente estudio tiene como objeto determinar, detallar y exponer las diferencias que existen entre la transmisión de alta potencia en AC (Alternating Current, Corriente Alterna) comparada con la transmisión de alta potencia en DC (Direct Current, Corriente Continua). Este trabajo abarcará desde el punto de generación de energía hasta el punto de consumo, tratando así de estimar qué método sería más eficiente.

## 2 Alcance

A lo largo de este Trabajo Final de Grado se abordará el estudio previamente presentado, tratando de cubrir al menos los aspectos que se detallan a continuación:

### 1. Estudio de las pérdidas de un sistema HVAC

Definición de fenómenos eléctricos que provocan las pérdidas de potencia más típicas de un sistema HVAC (High Voltage Alternating Current, Corriente Alterna de Alto Voltaje). También se analiza su procedencia y cómo tratar de mitigarlos.

### 2. Estudio del funcionamiento básico de un sistema HVDC

Descripción del funcionamiento básico de un sistema eléctrico HVDC (High Voltage Direct Current, Corriente Continua de Alto Voltaje). Se abarcará tanto los tipos de conexión, de configuraciones, como los tipos de sistemas que conviven en funcionamiento hoy en día.

### 3. Estudio de las pérdidas de un sistema HVDC

Punto semejante al anterior, pero tratándose de corriente continua.

### 4. Estudio de la generación de alta potencia en corriente alterna

Desarrollo del procedimiento general para obtener energía eléctrica de alta potencia en corriente alterna y explicación de los distintos tipos de centrales que funcionan hoy en día.

### 5. Estudio de la generación de alta potencia en corriente continua

Punto semejante al anterior, pero tratándose de corriente continua.

### 6. Estudio de los diferentes puntos de consumo en un sistema alimentado en corriente alterna

Eficiencia de los elementos necesarios para que se produzca un consumo de corriente alterna en un domicilio o industria típica.

#### 7. Estudio de los diferentes puntos de consumo en un sistema alimentado en corriente continua

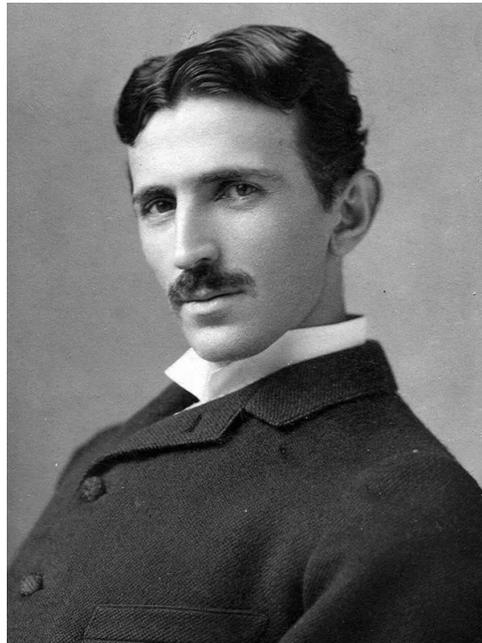
Punto semejante al anterior, pero tratándose de corriente continua.

## 3 Antecedentes

En este apartado se recoge la parte del estudio relacionada con la corriente alterna, cuyo uso en transporte está más extendido, y la que se ha tomado de referencia para realizar este estudio comparativo.

### 3.1. Introducción a la Corriente Alterna

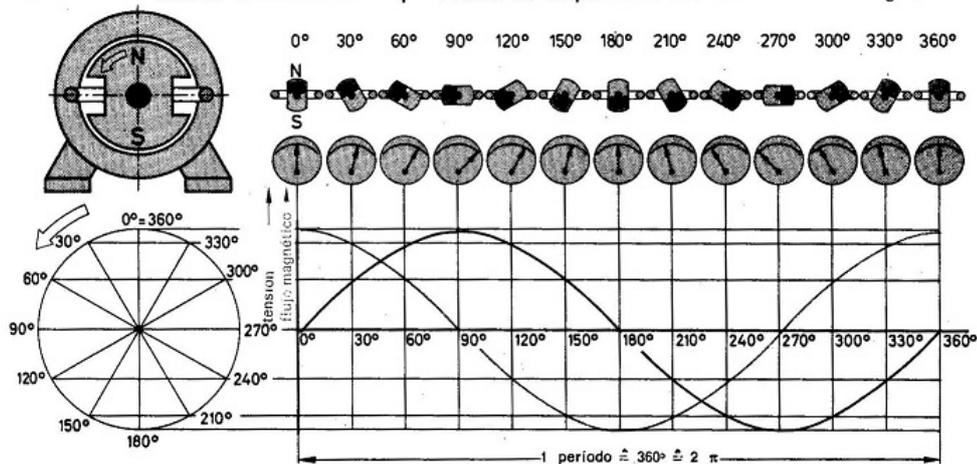
A partir del descubrimiento de la corriente alterna por parte de Nikola Tesla (figura 1), quien diseñó y construyó el primer motor de inducción de AC, se ha desarrollado una actividad tecnológica muy grande para poder transportar la energía eléctrica a todos los lugares que la demanden.



**Figura 1** – Nikola Tesla, descubridor de la corriente alterna.

Esta transmisión de energía eléctrica en AC era completamente necesaria ya que la AC

no se puede almacenar, y se puede definir como un tipo de corriente eléctrica, en la que la magnitud y dirección del flujo de cargas negativas (electrones) varían cíclicamente, cambiando su valor de un máximo positivo a un máximo negativo en cada semiperíodo. Esta definición se representa en la figura 2, en la que se representa que el acumulador se cargaría y descargaría 50 o 60 veces, en función de la frecuencia de la línea.



**Figura 2** – Onda senoidal de un generador bipolar de corriente alterna de inductor giratorio.

Dicha demanda de energía no es continua y en función del momento concreto, se ve afectada por un conjunto de factores entre los cuales se encuentran el tipo de industria existente en la zona, turnos que realizan en su proceso de producción, determinadas climatologías, estación del año y demás.

Para poder cubrir la demanda anteriormente comentada, se utilizan las denominadas centrales eléctricas, que se encargan de la producción de energía eléctrica y, generalmente, se sitúan en las proximidades de fuentes de energía básicas, tales como ríos, minas de carbón, etc.

La mayoría de las centrales eléctricas generan en AC ya que su aumento o reducción de tensión era económicamente asequible, en comparación con DC, gracias a los transformadores. Esto es una gran ventaja a la hora de transmitir potencia a lo largo de grandes distancias, ya que para una igual potencia, el incremento de la tensión supone una menor intensidad, provocando en menor medida los efectos que generan pérdidas de potencia en la línea.

Algunas de las aplicaciones a destacar, entre las muchas en las que se utiliza corriente alterna, son la iluminación (lámpara de arco incandescente, lámpara de arco, lámparas fluorescentes, etc.), el calor (cocinas eléctricas, calentadores, cafeteras, tostadoras, etc.), comunicaciones (radio, televisión, teléfono, etc.) y el suministro de la fuerza motriz a través de los motores eléctricos.

### 3.2. Generación de Corriente Alterna

Para la exposición de la generación de corriente alterna se ha decidido dividir este punto en dos partes: los generadores y las centrales.

### 3.2.1. Elementos generadores

Los generadores en corriente alterna se pueden definir como máquinas eléctricas capaces de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, generando una corriente alterna mediante inducción magnética.

Estos generadores están formados por dos piezas fundamentales, el estátor y el rotor, como se ilustra en la figura 3. El estátor se compone de una armadura metálica, el interior de la cual está cubierta de hilos de cobre, formando diversos circuitos.

El rotor se ubica en el interior del estátor y gira accionado por la energía mecánica de rotación, generada a partir de la energía primaria producida en la central eléctrica y transformada en una turbina, por ejemplo. Está formado por un eje y otra serie de circuitos que se comportan como electroimanes cuando se les aplica una determinada corriente.

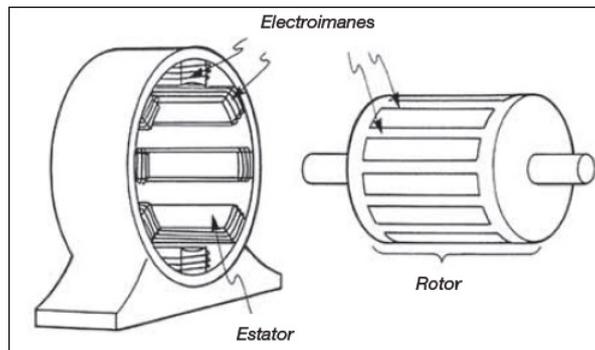


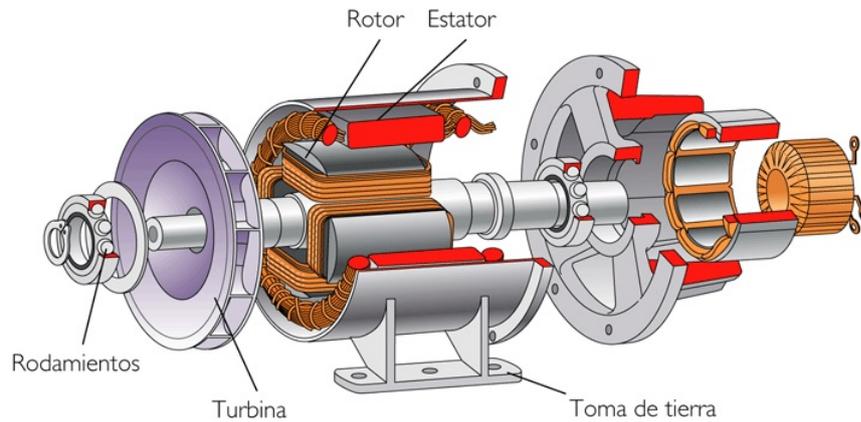
Figura 3 – Partes básicas de un generador eléctrico.

En el momento que el rotor gire a cierta velocidad, se inducirán unas corrientes por los hilos interiores del estátor, proporcionando al generador una fuerza electromotriz, que dará comienzo a la transmisión de corriente eléctrica al sistema al que esté conectado el generador.

En la mayoría de centrales eléctricas se emplea una turbina, que puede recibir energía primaria de múltiples formas (combustible, agua, aire, etc.), y transforma dicha energía primaria en energía mecánica de rotación gracias a su diseño y estructura.

Esta turbina estará ubicada, por ejemplo, junto al generador eléctrico al que le transmite la energía mecánica de rotación haciendo girar el rotor. A este conjunto se le denomina grupo turbina/generador.

El funcionamiento básico de cualquier grupo turbina/generador, representado en la figura 4, es muy parecido en todos los tipos de centrales, variando la forma de obtener la energía mecánica de rotación necesaria para la generación de la corriente eléctrica.



**Figura 4** – Partes básicas de un grupo turbina-generador.

### 3.2.2. Centrales eléctricas de corriente alterna

Los principales tipos de centrales eléctricas son los siguientes:

1. **Central Hidroeléctrica:** Son aquellas centrales en las que la energía potencial del salto de agua o del agua fluyente, se transforma en energía cinética, que se utiliza para mover una turbina hidráulica. Se construyen en el cauce de los ríos, derivando el agua por una tubería hacia los alabes de la propia turbina, conectada a un generador eléctrico.

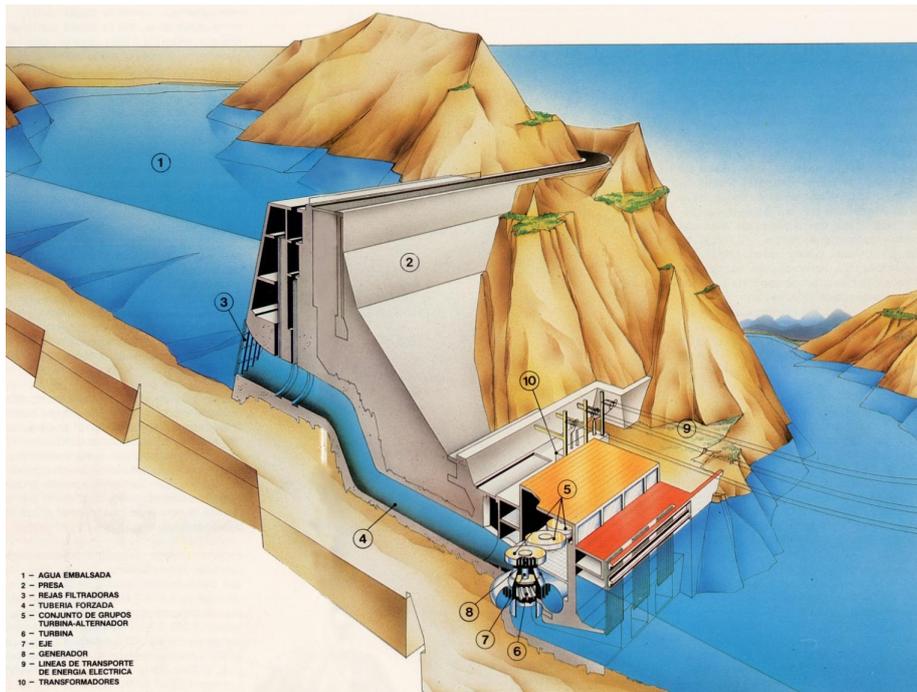
En la figura 5 se puede ver una disposición esquemática de este tipo de centrales.

Estas centrales no almacenan energía, sino que siguen el ritmo de la demanda solicitada, lo que genera una producción variable. Esta producción variable hace que la eficiencia de este tipo de centrales empeore. Si la producción fuese continua, su eficiencia aumentaría notablemente.

En este aspecto hay que definir las centrales hidráulicas de bombeo, las cuales sí pueden almacenar la energía producida, por ejemplo, en las centrales hidroeléctricas en horas de baja demanda.

Éstas cuentan con dos embalses a diferentes alturas, un proceso de funcionamiento que está activo hoy en día es el siguiente:

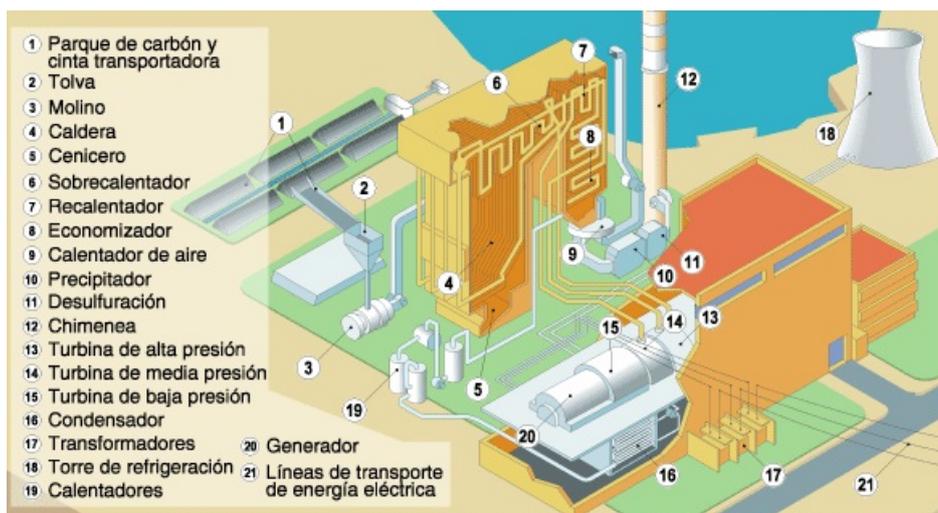
El primer embalse debe tener la capacidad suficiente para almacenar agua para las horas de alta demanda, desembocando la central que se alimenta de este primer embalse en el segundo. Desde este segundo embalse se bombeará agua al primero utilizando la turbina como bomba y el generador como motor.



**Figura 5** – Disposición esquemática de una central hidroeléctrica.

2. **Central Termoeléctrica Convencional:** En estas centrales, el movimiento del rotor necesario para la obtención de energía eléctrica se obtiene mediante el vapor producido al calentar agua en una caldera. El vapor generado tiene una alta presión, lo que permite que sea capaz de mover los álabes de la turbina con su expansión. El insumo más común utilizado en este tipo de centrales es el carbón.

En la figura 6 se puede ver el esquema de una central de este tipo. Los diferentes combustibles o formas de obtener el calor sólo variarían la parte correspondiente a la caldera.



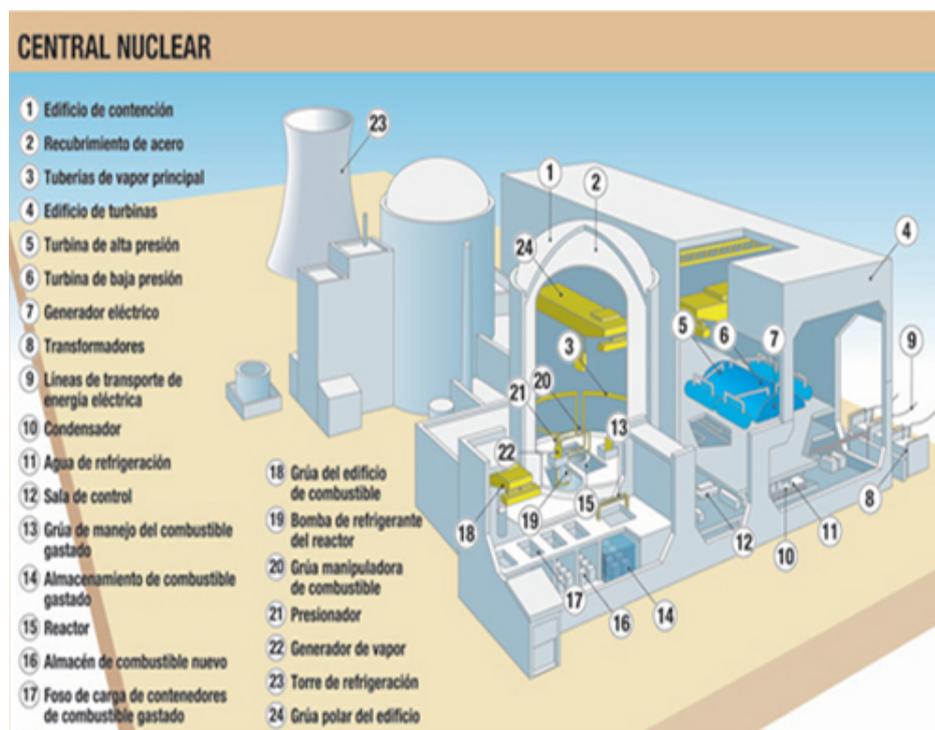
**Figura 6** – Disposición esquemática de una central termoeléctrica convencional.

3. **Central Nuclear:** Este tipo de centrales utilizan como caldera un reactor nuclear. En él se originan las reacciones nucleares de fisión del uranio, principal insumo de estas

centrales, que se encuentra en un depósito herméticamente cerrado.

El calor generado en las reacciones que tienen lugar en el interior del reactor es transferido a un líquido refrigerante, que a su vez se utiliza para generar vapor de agua, el cual es dirigido hacia la turbina que estará conectada a un alternador.

En la figura 7 se puede ver cómo estarían estructuradas este tipo de centrales. Su funcionamiento básico es similar a las anteriores, pero debido a la complejidad del combustible usado se estudian, en su mayoría, por separado.



**Figura 7** – Disposición esquemática de una central nuclear PWR (Pressurized Water Reactor, Reactor de Agua a Presión).

4. **Central Eólica:** Son las centrales donde la energía cinética del viento es transformada en energía mecánica de rotación, para lo cual en una torre se instala un rotor con múltiples palas.

Este tipo de instalación en torre permite que el conjunto se pueda orientar hacia la dirección del viento, que hará que las palas giren alrededor de un eje horizontal que estará conectado a un generador.

En la figura 8 se puede ver un esquema de este tipo de centrales. Últimamente este tipo de centrales se instalan en el mar, y son conocidas como offshore.

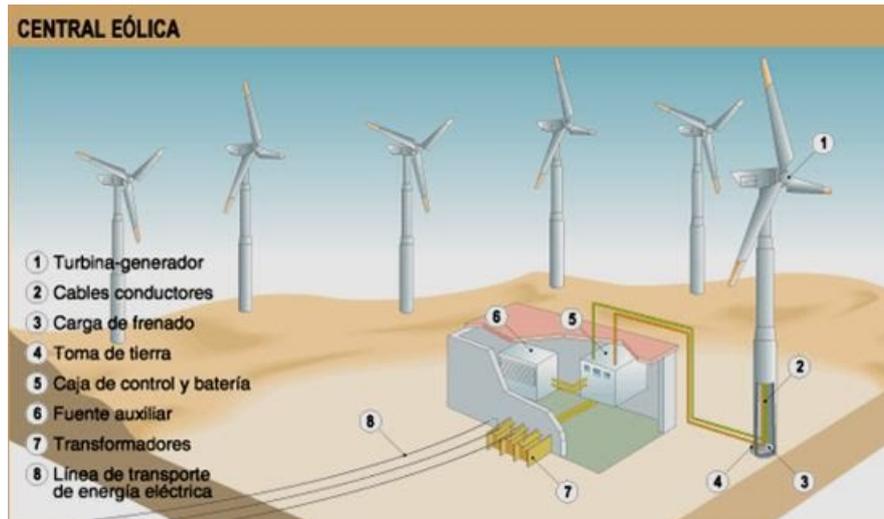


Figura 8 – Disposición esquemática de una central eólica.

5. **Central Solar:** Tendremos aquí en cuenta centrales que funcionan mediante la captación de la radiación solar, ya sea con heliostatos (concentración en un único punto, alta temperatura), o con cilindros parabólicos (calentando un tubo central de los cilindros, media temperatura).

Las centrales solares más comunes son las primeras, en las que los heliostatos (espejos orientables) reflejan los rayos solares hacia un foco, por el que circula un fluido que se calienta y pasa por una caldera similar a la descrita en las centrales termoeléctricas, calentando agua a su paso. En la figura 9 se representa una central con este tipo de funcionamiento.



Figura 9 – Partes de una central solar fotovoltaica con heliostatos.

### 3.3. Pérdidas en un sistema HVAC

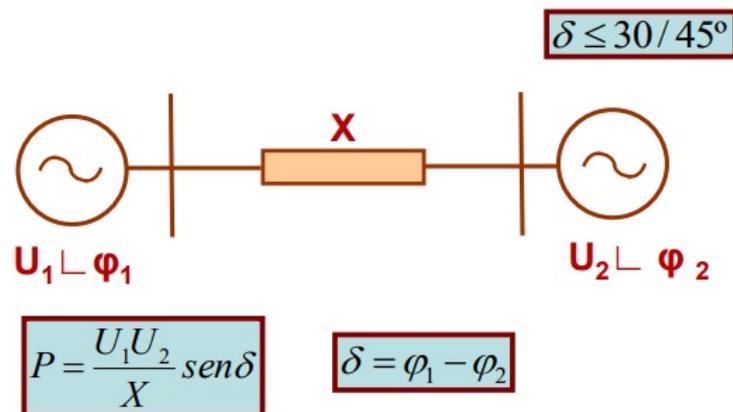
Las pérdidas más comunes son debidas a la reactancia y longitud de la línea de transporte.

A partir de una cierta longitud, conocida como "longitud límite", se estima que es más conveniente el uso de un sistema HVDC que un sistema HVAC, por la sencilla razón de su rentabilidad.

Las pérdidas de potencia que más afectan a una línea de HVAC son las siguientes:

1. **Estabilidad del sistema:** Todos los nudos de una red HVAC tienen dos importantes características o datos propios, que son la tensión y el ángulo de esta misma.

La transferencia de potencia entre ambos nudos depende del desfase angular entre éstos. Además, la máxima capacidad de transferencia se ve limitada por la estabilidad transitoria del sistema, representada en la figura 10.



**Figura 10** – Estabilidad transitoria de una red HVAC.

Se define la estabilidad de un sistema de energía eléctrica como la capacidad del propio sistema de volver al estado de funcionamiento inicial, tras estar sometido a algún tipo de perturbación.

Se puede formular la estabilidad de un sistema mediante la ecuación 1:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

En la que se define:

Los parámetros  $U$  son las tensiones a uno y otro lado de la conexión.

El ángulo  $\delta$  representa el desfase entre las tensiones anteriores.

$X_L$  representa la reactancia de la línea.

Como se puede observar, la transferencia de potencia máxima se produce cuando  $\delta$  es igual a  $90^\circ$ , lo que nos lleva a la ecuación 2, donde la potencia máxima estable es el límite de estabilidad del sistema.

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \quad (2)$$

Normalmente las reactancias de los sistemas de transmisión se encuentran en los transformadores, subestaciones y las propias líneas, las cuales se pueden formular mediante la ecuación 3:

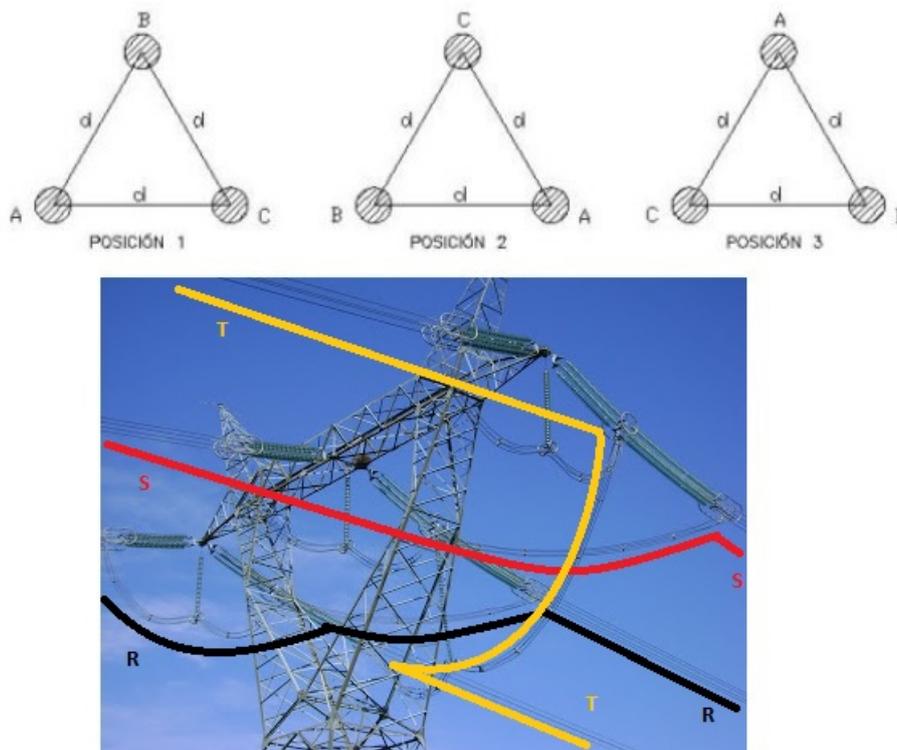
$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3)$$

Donde la reactancia, la variable  $L$  de la ecuación 3, detallada con más exactitud en el anexo de cálculos del presente TFG, depende directamente de la longitud de la línea. A mayor longitud de línea mayor reactancia, lo que implica mayores pérdidas.

En contraposición, las líneas de transmisión de HVDC no cuentan con este problema de la reactancia y los límites de estabilidad se ven superados ya que no está relacionada con la distancia. Por lo que la estabilidad, coincide con la potencia máxima a transmitir en un sistema HVDC, y se pueden calcular ambas mediante la ecuación 4:

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

Para intentar disminuir estas pérdidas, hay un método, conocido como transposición, que consiste en que todos los conductores ocupen alternadamente todas las posiciones de fase posible, haciendo el cambio de posición en los apoyos de la línea, para que los valores de inductancia y capacidad de la línea permanezcan aproximadamente iguales a lo largo de toda la longitud de la línea. A continuación, en la figura 11, se representa una transposición en proceso en una línea aérea.

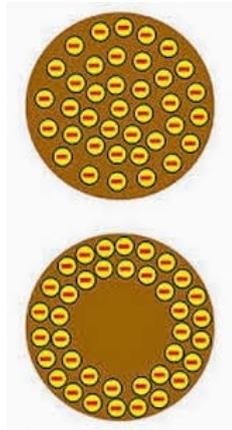


**Figura 11** – Representación del método de transposición en una línea aérea.

Al hilo de esta diferencia en las pérdidas asociadas a la longitud, hay estudios que relacionan la viabilidad del transporte en HVAC y HVDC con respecto a la longitud de la línea, como se recoge en los resultados finales de este estudio.

2. **Efecto Skin o Pelicular:** Se puede definir como la tendencia de la corriente a desplazarse a la capa externa del conductor debido a la autoinducción del mismo, dando lugar a un aumento de la resistencia efectiva en el núcleo de dicho conductor, y a una disminución de la intensidad admisible para un determinado aumento de la temperatura. Este efecto se ve representado en la figura 12.

Para intentar corregirlo se utiliza el hilo de Litz, el cual es un cable compuesto de muchos conductores de pequeña sección aislados entre si y unidos solo en los extremos.



**Figura 12** – Efecto Skin en un conductor de una línea de corriente continua (superior) y otro de una línea de corriente alterna (inferior).

3. **Efecto Corona:** Consiste en la ionización del aire que rodea al conductor. Sucede cuando el gradiente eléctrico supera la rigidez dieléctrica del aire, y se manifiesta en forma de pequeñas chispas, o descargas, muy próximas a los conductores.

Este efecto está representado en la figura 13 y se calcula mediante las ecuaciones 5, 6, 7 y 8.

Para que no se produzcan descargas y pérdidas de potencia por la aparición de este efecto, la tensión crítica a la que se produce, calculada mediante la ecuación 5, debe ser menor que la máxima nominal.

$$U_c = 84 \cdot m_c \cdot \delta \cdot m_t \cdot r \cdot \log\left(\frac{DMG}{r}\right) (V) \quad (5)$$

Donde se define:

$U_c$ , como el valor de cresta del campo crítico de inicio de descargas corona.

$m_c = 1$  para superficies lisas, y para conductores compuestos por alambres toma valores entre 0,83 y 0,87.

$\delta$ , como densidad relativa del aire.

$m_t = 1$  para tiempo seco y 0,8 para tiempo lluvioso.

$r$ , como el radio del conductor.

$DMG$ , como Distancia Media Geométrica, siendo esta la media geométrica de las distancias de cada hilo de cada fase con cada uno de los hilos de las otras fases.

Para el cálculo de la densidad relativa del aire se necesita la siguiente ecuación 6:

$$\delta = \frac{273 + 25}{273 + \theta_{amb}} \cdot \frac{p}{760} \quad (6)$$

Donde se define:

$\theta_{amb}$ , como la temperatura ambiente, en grados centígrados.

$p$ , como la presión atmosférica, en miligramos de mercurio.

Para el cálculo de la presión atmosférica bajo esas condiciones de trabajo se necesita la ecuación 7:

$$\log(p) = \log(76) - \frac{Y}{18336} \quad (7)$$

Donde se define:

$Y$ , como la altura medida en metros sobre el nivel del mar.

Para los casos en los que se produzca el efecto corona, se deberán calcular las pérdidas de potencia activa que se producen. Esto se consigue gracias a la ecuación 8:

$$P_{corona} = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{DMG}} \cdot (U_n - U_c)^2 \cdot 10^{-5} \quad (8)$$

Donde se define:

$\delta$ , definida anteriormente como densidad relativa del aire.

$P_{corona}$ , como los  $\frac{kW}{km}$  de pérdidas a lo largo de la línea.

$f$ , como la frecuencia de la línea.

$r$  es el radio del conductor.  $U_n$ , como el valor de tensión nominal de la línea.  $U_c$ , como el valor de cresta del campo crítico de inicio de descargas corona.

Como se aprecia al ver las anteriores ecuaciones, el efecto corona depende de de muchos y muy diferentes aspectos.

Todas las líneas eléctricas se diseñan para que, en la medida de lo posible, no se supere el límite impuesto para que este efecto se manifieste de manera mínima y/o controlada.



**Figura 13** – Representación efecto Corona en una línea de transporte.

4. **Compensación de líneas:** Las líneas eléctricas de corriente alterna que cubren una gran longitud, necesitan de subestaciones intermedias que compensen la energía reactiva, para poder afrontar un exceso de demanda.

Para realizar dicha compensación se utilizan baterías de condensadores o grupos de bobinas, según la necesidad.

5. **Corrientes de cortocircuito:** En corriente alterna siempre existe la posibilidad de que se generen cerca de la aparatada instalada en la línea, elevadas corrientes de cortocircuito.

En líneas de alta tensión, la mayoría de las corrientes de cortocircuito son producidas por descargas atmosféricas que generan llamas en los aisladores y un nuevo camino para la corriente a través del aire ionizado.

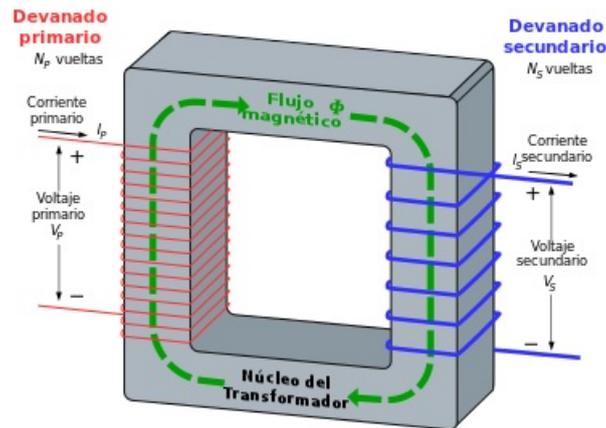
Otro tipo de consecuencias son que los elementos sufren un calentamiento excesivo y en algunos casos se produce la fusión de elementos cercanos, fuerzas mecánicas elevadas que produzcan la destrucción de los devanados, caídas o elevaciones de tensión en las otras fases, perturbaciones en otro tipo de líneas, etc.

En corriente continua también se generan dichas corrientes, pero en mucha menor medida, dado que se utiliza un número menor de conductores.

### 3.4. Consumo de Corriente Alterna

El transporte de energía eléctrica a lo largo de grandes distancias se implementó en corriente alterna ya que, gracias a los transformadores, se podían efectuar variaciones en la tensión con rendimientos cercanos al 100 %.

En la figura 14 se adjunta una representación esquemática de un transformador genérico.



**Figura 14** – Representación esquemática de un transformador eléctrico.

Para una misma potencia, si se eleva la tensión, la intensidad a transmitir disminuye, lo que se traduce como una disminución de pérdidas asociadas tanto a la resistencia eléctrica del cable como a la reactancia, utilizada más adelante en el presente TFG, en el anexo de cálculos.

Estas variaciones de tensión en corriente continua tenían unos rendimientos muy inferiores a los transformadores en alterna, hasta que se desarrollaron los dispositivos convertidores de potencia que existen hoy en día.

La eficiencia, ecuación 9, de un transformador es la relación que existe entre su potencia eléctrica de salida y su potencia de entrada, bajo condiciones específicas de operación.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Por lo que se puede concluir que a mayor pérdidas menor eficiencia, y menos rentable será la utilización de ese elemento frente a otro con menores pérdidas.

## 4 Normas y referencias

### 4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

REAL DECRETO 223/2008, DE 15 DE FEBRERO; *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas aéreas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.*

## 4.2. Bibliografía

- [1] RODRÍGUEZ ARIAS, P. RUIZ HERNÁNDEZ, J.L.; *Corriente Alterna*, Barcelona, McGrawHill, (2006).
- [2] RODRÍGUEZ ARIAS, P. RUIZ HERNÁNDEZ, J.L.; *Corriente Continua*, Madrid, McGrawHill, (2006).
- [3] SIMÓN COMÍN, P.; *Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión; aplicación del Reglamento de líneas de alta tensión : Real Decreto 223-2008 de 15 de Febrero*, Madrid, Ibergarceta, (2011).
- [4] TURÉGANO PASTOR, J.V.; *Ingeniería del medio rural: electrotecnia*, Valencia, Obrapropia, (2010).
- [5] ARRILLAGA, J.; *High voltage direct current transmission*, Stevenage : The Institution of Electrical Engineers, (1998).
- [6] RAS I OLIVA, E.; *Teoría de líneas eléctricas de potencia, de comunicación para transmisión en continua*, Barcelona, Marcombo, (1973-1985).
- [7] W. HART, D.; *Introducción a la Electrónica de potencia*, Madrid, Pearson Education, S.A., 2001.

## 4.3. Otras referencias

- [8] *Red Eléctrica Española*, disponible en: <http://ree.es/>, [Consulta: 7 de Marzo de 2018].
- [9] *ABB Group*, disponible en: <http://new.abb.com/es/>, [Consulta: 10 de Marzo de 2018].
- [10] *Siemens España*, disponible en: <http://siemens.com/es/es/home.html/>, [Consulta: 12 de Marzo de 2018].

# 5 Definiciones y abreviaturas

Todas las definiciones y abreviaturas presentes a lo largo del presente TFG se recogen a continuación:

**TFG:** Trabajo de Fin de Grado.

**AC:** Corriente Alterna.

**DC:** Corriente Continua o Directa.

**HVAC:** Corriente Alterna de Alto Voltaje.

**HVDC:** Corriente Continua de Alto Voltaje.

**U:** Tensión.

**V:** Voltios.

**I:** Intensidad.

**A:** Amperios.

**R:** Resistencia.

$\Omega$ : Ohmios.

**L:** Inductancia.

**X:** Reactancia.

**H:** Henrios.

**C:** Capacitancia.

**F:** Faradios.

**f:** Frecuencia.

**Hz:** Herzios.

**PWR:** Pressurized Water Reactor, Reactor de Agua a Presión.

**P:** Potencia activa.

**W:** Watios.

**Q:** Potencia reactiva.

**VA:** Voltiamperios reactivos.

**f.d.p.:** Factor de potencia.

sin: Función seno.

cos: Función coseno.

tan: Función tangente.

**DMG:** Distancia Media Geométrica.

**RMG:** Radio Medio Geométrico.

log: Función logaritmo en base 10.

**BJT:** Bipolar Junction Transistor, Transistor Bipolar.

**MOSFET:** Metal Oxide Semiconductor Fiel Effect Transistor, Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido y Semiconductor.

**IGBT:** Insulated Gate Bipolar Transistor, Transistor Bipolar de Puerta Aislada.

**GTO:** Gate Turn Off Thyristor.

**kV:** Kilovoltio.

**MW:** Megawatio.

**VSC:** Voltage Source Converter, Convertidor Autoconmutado.

**LCC:** Line Commutated Converter, Convertidores Conmutados en Red.

**S:** Switch, Interruptor.

**D:** Diodo.

## 6 Requisitos de diseño

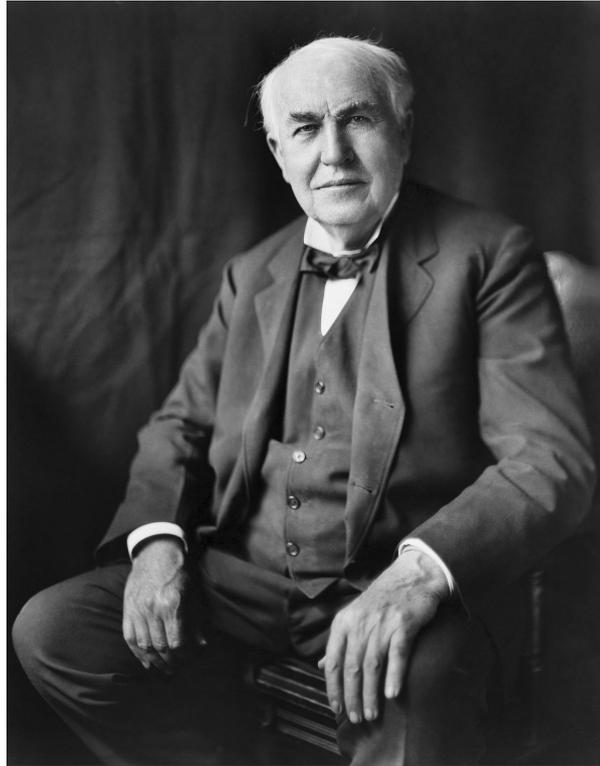
Los requisitos para la realización de este TFG han sido los siguientes :

1. **Generación de energía eléctrica** Los métodos que utilizamos en nuestros días para la obtención de energía eléctrica son válidos tanto para generar corriente alterna como continua, siendo la única diferencia el tipo de elemento generador que se utiliza.
2. **Transporte de energía eléctrica** Se compararán los elementos necesarios para el transporte de energía eléctrica en un sistema HVAC y otro HVDC, con el fin de detallar, según la cuantía de pérdidas sufridas por la línea, qué sistema será el idóneo en cada caso.
3. **Consumo de energía eléctrica** Dependiendo del tipo de aparato al cual queremos transmitir una corriente, o el tipo de maquinaria que necesitemos alimentar en una industria o en otra, influirá en el tipo de transmisión que consideraremos idónea para alimentar nuestras instalaciones.

## 7 Análisis de las soluciones

### 7.1. Introducción a la Corriente Continua

A partir del descubrimiento de Thomas Alva Edison, figura 15, de la corriente continua, se comenzó a utilizar para el transporte de energía eléctrica.



**Figura 15** – Thomas Alva Edison, descubridor de la corriente continua.

En el siglo XX este uso decayó en favor de la corriente alterna debido a sus menores pérdidas en el transporte a larga distancia en aquella época.

La corriente continua se puede definir como un flujo constante e incesante de cargas entre dos puntos en los que se produce una diferencia de potencial.

Cabe destacar que la DC no cambia su polaridad en cada semiciclo, si no que se mantiene constante, por lo que se puede almacenar en los distintos elementos que se detallan a lo largo de este punto del estudio.

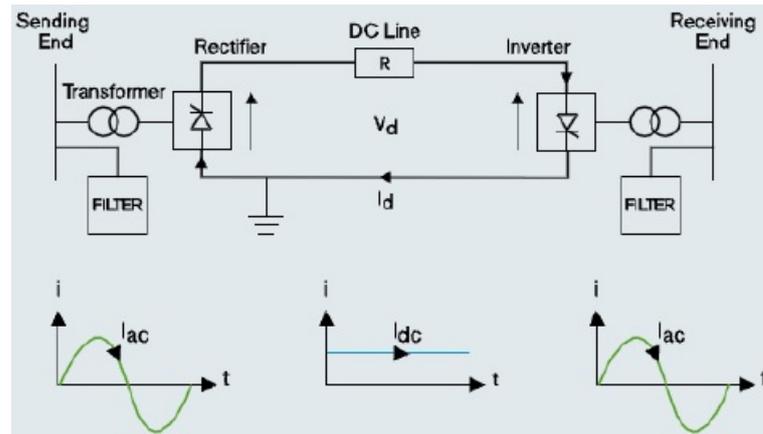
Hoy en día se ha vuelto a extender el uso de corriente continua en alta potencia a partir del desarrollo de la electrónica de potencia y las células solares, dado su casi nulo impacto medioambiental frente a soluciones convencionales.

## 7.2. Funcionamiento básico de un sistema HVDC

Para el desarrollo de este punto se ha tenido en cuenta el sistema HVDC como elemento de transporte únicamente, utilizándolo como sistema de unión entre dos sistemas HVAC.

Por la diferente naturaleza de la corriente alterna y la corriente continua es necesario el uso de dispositivos que transformen un tipo de energía en otro, los que se conoce como convertidores de potencia.

En la figura 16 vemos que una línea HVDC normalmente cuenta con dos convertidores de potencia, cada uno a un extremo de la red, inductancias de línea, filtros a la salida del convertidor y cables conductores que comunican las distintas estaciones.



**Figura 16** – Representación esquemática de una línea HVDC.

Cabe comentar que las características de cada uno de estos componentes dependen del tipo de tecnología implementada en la construcción del propio sistema HVDC, como se explicará a lo largo de este TFG.

Otros elementos indispensables en estas redes para su correcto funcionamiento son los filtros, pues los convertidores de potencia generan armónicos. Además es necesario el uso de un transformador para adecuar la tensión de red a los niveles necesarios para el correcto funcionamiento del convertidor de potencia, aparte de proporcionar un aislamiento galvánico entre las dos secciones de la red de transporte.

### 7.2.1. Convertidores Eléctricos

Podemos encontrar cuatro clases de convertidores según el tipo de conversión que realizan, explicados genéricamente a continuación.

#### 1. Convertidores AC/DC:

También conocidos como rectificadores, transforman corriente alterna monofásica o trifásica, en continua.

Hoy en día, la inmensa mayoría de elementos electrónicos que se conectan a la red eléctrica disponen de esta clase de convertidores para poder alimentarse, elementos como ordenadores, teléfonos, equipos de música, etc.

En el mundo industrial sus aplicaciones en máquinas eléctricas, motores en su mayoría, se comentan a continuación.

- a) Motores de DC: como alimentación tanto del circuito del inducido como el de excitación.
- b) Motores especiales: se refiere a motores paso a paso o brushless (sin escobillas), que necesitan una fuente de DC. En el primer tipo de estos motores debe conmutarse de una manera precisa para conseguir el control del motor, y en el segundo tipo dicha fuente es el paso previo para alimentar un convertidor DC/AC.

2. **Convertidores DC/DC:** Transforman un valor de entrada de corriente continua en otro distinto de salida, con la posibilidad de proporcionar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida.

Sus utilidades son casi las mismas que las de los convertidores AC/DC, radicando su diferencia principal en que la fuente de alimentación en este caso es en DC, restringiendo así su aplicación a sistemas donde la alimentación ya está en continua, pero es necesario variar su valor por algún motivo. Por ejemplo, los paneles solares generan una tensión variable en función de la radiación que reciben, y disponen de un convertidor de este tipo para estandarizar la tensión de salida, y que no fluctúe aún variando la tensión generada en las celdas solares.

3. **Convertidores DC/AC:** También conocidos como inversores, transforman la corriente continua en corriente alterna, pudiendo controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida .

Son fundamentales en el diseño de accionamientos basados en máquinas síncronas y asíncronas. Se utilizan también en los generadores eólicos que generan en continua, ya que necesitan generar una corriente alterna adecuada para verter a la red a la que esté conectado el parque eólico.

4. **Convertidores AC/AC:** También conocidos como cicloconvertidores, modifican el valor eficaz de la tensión o de la frecuencia de entrada.

En lo que consisten estos convertidores últimamente, es en realizar una conversión AC/DC primero para a continuación realizar otra conversión DC/AC.

Su utilización está centrada en el campo de arrancadores suaves para reducir la intensidad necesaria para el arranque de los motores de inducción, usándose también durante mucho tiempo para el control de velocidad de motores. En su mayoría los motores en los que se utilizan estos convertidores son los siguientes:

- a) Motores asíncronos: para controlar la velocidad y frenado de este tipo de máquinas.
- b) Motores síncronos: si dicha máquina se encuentra trabajando como generador, el convertidor servirá como alimentación para la excitación de la máquina. Si el motor síncrono trabaja como motor, el convertidor será necesario también para la excitación de la máquina como para realizar la rectificación de la corriente para pasar al convertidor DC/AC, que alimentará la máquina a tensión y frecuencia variables.

Además, también se utilizan en algunos tipos de generadores eólicos, aquellos que generan en alterna y disponen de un convertidor de este tipo para conseguir que la velocidad de giro pueda llegar a ser independiente de la velocidad de sincronismo.

### 7.2.2. Dispositivos de potencia

Hay varios dispositivos de potencia, a continuación se explican los más destacados y más característicos en la transmisión, generación y consumo de energía eléctrica.

1. **Diodos:** Se puede definir como un elemento electrónico que consta de dos terminales, ánodo y cátodo, que permite que circule la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido.

Todos los demás dispositivos de potencia que se van a tratar en este punto se basan en este elemento, representado en la figura 17.

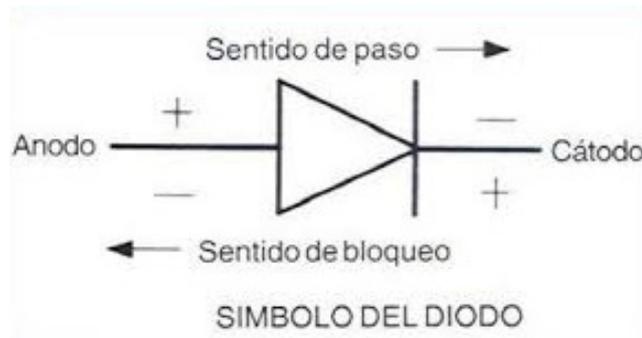


Figura 17 – Representación de un diodo

2. **Transistores:** Es otro elemento electrónico que se utiliza para entregar una señal de salida en función de una señal de entrada.

Dentro de los transistores se pueden diferenciar claramente dos tipos.

- a) **Transistor Bipolar o BJT:** Permite la elevación o reducción del voltaje. Consiste en dos uniones PN muy cercanas entre sí, separadas por una región muy estrecha, delimitando tres partes, que se conocen como emisor, base y colector.

En la figura 18 se representan gráficamente los dos tipos de BJT que se pueden encontrar según la disposición de las uniones anteriormente citadas.

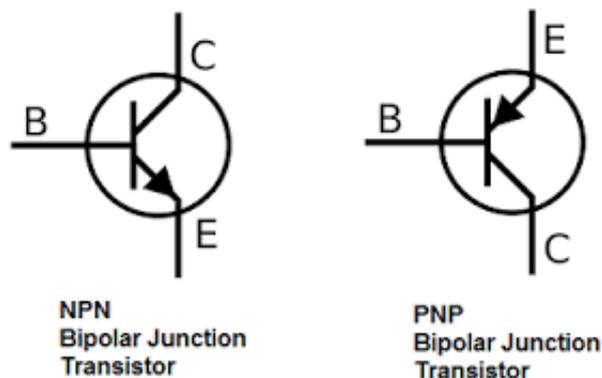


Figura 18 – Representación de un transistor BJT (Bipolar Junction Transistor).

Entre sus principales utilidades se pueden destacar la ampliación de señal (radio, televisión, instrumentación, etc.), en conmutación actuando como interruptores y la generación de señales (osciloscopios, generadores de ondas, etc.).

- b) **Transistor de efecto de campo o FET y transistor de efecto de campo de metal óxido y semiconductor o MOSFET:** El FET usa el campo eléctrico para controlar

la conductividad de un canal que transporta un solo tipo de carga, mientras que el MOSFET permite la amplificación o conmutación de señales electrónicas.

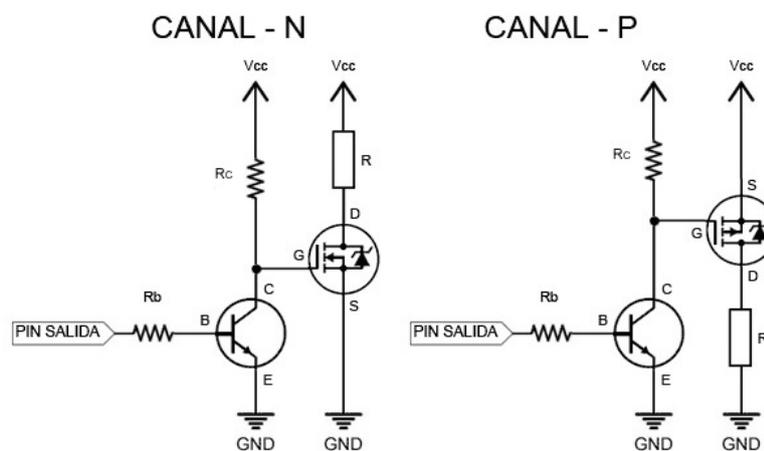
Son dispositivos de cuatro partes, llamadas fuente (S, source), drenador (D, drain), puerta (G, gate), y sustrato (B, bulk), de las cuales solo las tres primeras tienen un terminal. Cabe destacar que normalmente en el interior, la parte del sustrato puede estar conectada a la parte de la fuente.

Los puede haber de dos tipos:

El primero, llamado de enriquecimiento, que hace referencia al incremento de conductividad eléctrica debido a un aumento en los portadores de carga en la región correspondiente al canal. El canal puede formarse con un incremento de electrones (canal tipo N) o de huecos (canal tipo P).

El segundo, llamado de depleción, tiene el canal conductor en reposo, que se debe mitigar aplicando una tensión en la puerta, que genera una disminución de portadores de carga y una disminución de la conductividad.

En la figura 19 podemos observar estos dos tipos de MOSFET representados gráficamente.

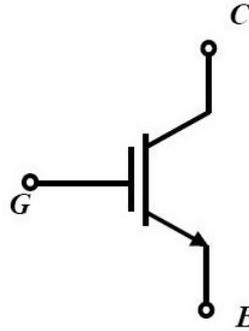


**Figura 19** – Representación de un transistor BJT y un transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Fiel Effect Transistor). Tipo N (izq.) y tipo P (drch.).

- c) **Transistor IGBT:** El transistor bipolar de puerta aislada se utiliza normalmente como un interruptor controlado.

Es una mezcla entre los MOSFET y los BJT, y para su encendido simplemente es necesario una tensión positiva de entrada en la puerta de entorno 15 Voltios, lo que causa que el tiempo de encendido sea menor a 1 milisegundo. Después, el terminal de drenado debe tener la misma corriente que la corriente de carga, que suponemos que es continua.

Se compone de una puerta aislada FET (Field-effect transistor), para la entrada de control, de un colector y un emisor, como se representa en la figura 20.



**Figura 20** – Representación de un transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Actualmente y gracias a la evolución de la física de los semiconductores, estos dispositivos electrónicos soportan niveles mucho mayores de corriente y tensión, por lo que sus utilidades en la electrónica de potencia se han visto aumentadas.

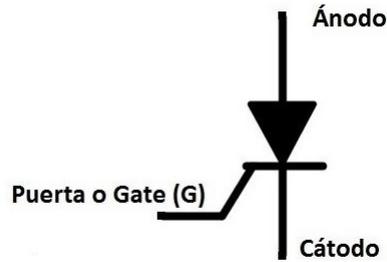
Estas utilidades son las de trabajar como convertidor, inversor, controles de velocidad de motores y la amplificación de corriente.

3. **Tiristores:** Familia de elementos electrónicos que constan de tres terminales, el ánodo, el cátodo y la puerta. Son conmutadores biestables, permitiendo o bloqueando el paso de la corriente dependiendo de la excitación que se le inyecte por dicha puerta y si hay una tensión positiva entre el ánodo y el cátodo.

Existen cinco métodos para disparar los tiristores, que se comentan a continuación.

- a) Disparo por puerta: Es el método más utilizado normalmente, el cual consiste en la aplicación de un impulso positivo de intensidad en el terminal de puerta y en el de cátodo a la vez que se mantiene una tensión positiva entre ánodo y cátodo.
- b) Disparo por módulo de tensión: Este método se basa en la estructura de un transistor, y si se aumenta la tensión entre colector y emisor, se alcanza un punto en el que la energía de los portadores de la corriente de fuga, es suficiente para generar nuevos portadores en la unión del colector, produciéndose el fenómeno de avalancha.
- c) Disparo por gradiente de tensión: Cuando a un tiristor se le aplica un escalón de tensión positiva con un tiempo de subida muy corto entre el ánodo y el cátodo, los portadores se desplazan para afrontar la tensión exterior aplicada.
- d) Disparo por radiación: La radiación electromagnética de una determinada amplitud de onda provoca una elevación de corrientes de fugas por encima del valor crítico, provocando el disparo del elemento.
- e) Disparo por temperatura: Asociado al aumento de pares electrón/hueco generados en las uniones del semiconductor.

En la figura 21 se representa gráficamente uno de estos elementos.

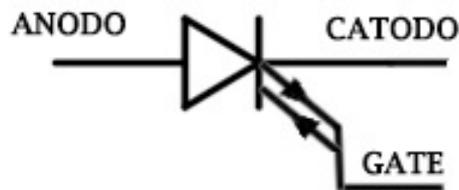


**Figura 21** – Representación de un tiristor

Se utilizan normalmente como elementos de control, para modular por ancho de pulso la tensión en un circuito eléctrico.

Dentro de los tiristores se deben citar los **tiristores GTO**, los cuales básicamente son unos tiristores que se pueden encender y, como diferencia principal, también se pueden apagar por un pulso de corriente negativa en el terminal de la puerta.

Se representa esquemáticamente este tipo de tiristores en la figura 22.



**Figura 22** – Representación de un tiristor GTO (Gate Turn-Off Thyristor).

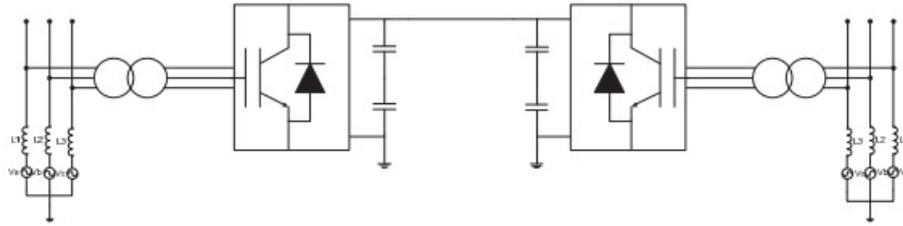
### 7.2.3. Tipo de conexiones

Al contrario que ocurre en AC, que cuando el sistema está equilibrado en tensión y corrientes, la corriente por el conductor de retorno es nula, mientras que en DC siempre debe existir una corriente de retorno igual a la enviada a la carga.

Los sistemas HVDC permiten varios tipos de conexión con sus respectivas características:

#### 1. Conexión Monopolar:

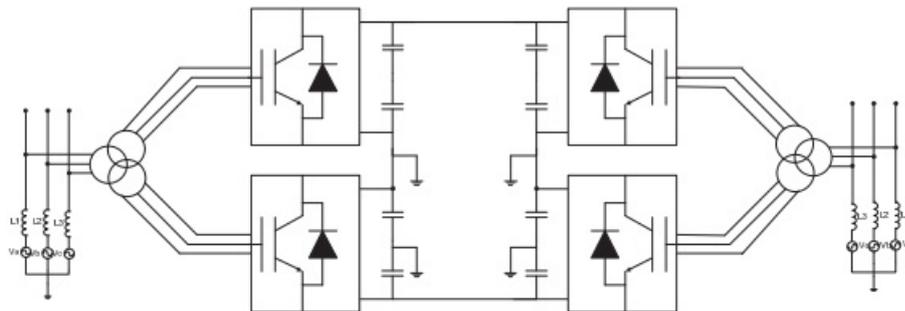
Consiste en un único cable de alta tensión conectado a tierra en las centrales de conversión. Se utiliza en grandes distancias ya que supone un ahorro económico importante. En ciertas ocasiones, por razones medioambientales o para evitar pérdidas notables, se coloca un conductor adicional de retorno. En la figura 23 se muestra la conexión básica de este tipo de conexión.



**Figura 23** – Esquema básico de una línea HVDC con conexión monopolar con retorno por tierra.

## 2. Conexión Bipolar:

Esta conexión consiste de dos sistemas monopolares independientes que pueden hacer a veces de polos positivos y negativos, con la capacidad y/o ventaja de poder funcionar independientemente en caso de que alguno de ellos falle. En la imagen 24 se representa un esquema básico de esta conexión.



**Figura 24** – Esquema básico de una línea HVDC con conexión bipolar.

## 3. Conexión Homopolar:

Consta de dos conductores de alta tensión con la misma polaridad, y un conductor de retorno por el que circula el doble de la intensidad nominal de una de las líneas.

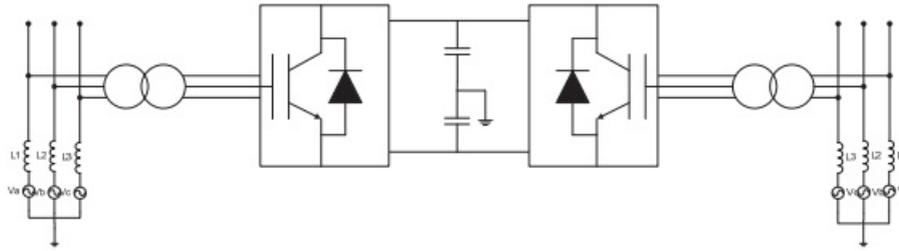
### 7.2.4. Tipo de configuraciones

Aparte de los tipos de conexión de los sistemas HVDC, es necesario citar los tipos de configuración existentes:

#### 1. Configuración Back to back:

Conecta dos sistemas asíncronos muy cercanos, por lo que no es necesario una línea para conectarlos. También se utiliza cuando se requiere un control preciso del flujo de potencia entre ambos sistemas.

En la figura 25 se muestra la configuración descrita anteriormente.



**Figura 25** – Esquema básico de un línea HVDC con configuración back to back.

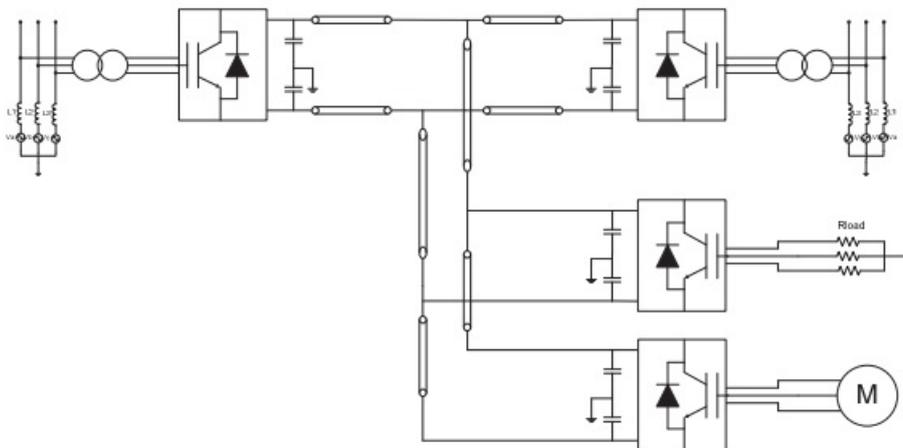
## 2. Configuración Punto a punto:

Se realiza directamente entre dos subestaciones, que a su vez funcionarán como convertidores, ya sea rectificador o inversor, en función del direccionamiento del flujo de potencia. Es la configuración más extendida hasta el momento.

## 3. Configuración Multiterminal:

Conecta tres o más subestaciones a un mismo sistema HVDC. Existen tres tipos de configuración multiterminal.

En la figura 26 se observa un ejemplo de esta configuración.



**Figura 26** – Esquema básico de un línea HVDC con configuración multiterminal.

Se puede definir dentro de este punto tres tipos distintos de conexión:

### a) Multiterminal Paralela:

Todas las subestaciones se encuentran conectadas a la misma tensión. Se aplica cuando las subestaciones superan entorno al 10% la potencia total de las de las subestaciones rectificadoras.

### b) Multiterminal Serie:

Todas las subestaciones se encuentran conectadas a una tensión diferente. En este tipo hay que tener especial atención al rendimiento de las distintas subestaciones, ya que una caída de tensión afectará directamente a la tensión nominal de la red.

c) **Multiterminal Mixta:**

Como su propio nombre indica, cada subestación puede estar conectada de manera paralela o en serie.

4. **Conexión Unitaria:**

Utilizada principalmente en las centrales hidroeléctricas o eólicas, ya que es donde es posible alcanzar la máxima eficiencia en las turbinas, debido a que el inversor se encargará de proporcionar a la red la señal de tensión a la frecuencia necesaria, ya sean 50 o 60 Hz.

### 7.2.5. Tipo de sistemas de conversión

Otro punto interesante a citar son las distintas tecnologías utilizadas hasta el momento en las líneas HVDC, que son:

1. **VSC (Voltage Source Converter o Convertidores Autoconmutados):**

Esta tipología está basada en modular el convertidor, basado en GTO's o IGBT's, como una fuente de tensión, lo que hace posible el control de nivel de tensión y su frecuencia. Una característica a destacar es el gran control de la cantidad de potencia reactiva que se transmite.

El rango máximo de trabajo en estos sistemas está determinado por el rango de los convertidores. En configuración monopolar se han alcanzado los 350 kV, transportando 300 MW, conocido como Caprivi Link, localizado en Namibia. Mientras que en configuración bipolar, trabajando con convertidores de dos niveles (que genera una tensión de salida con dos valores distintos respecto al terminal negativo del condensador de entrada), se han alcanzado los 150 kV, transportando 350 MW, conocido como Estlink, que conecta Estonia con Finlandia.

En la figura 27 se muestra un esquema básico de este tecnología.

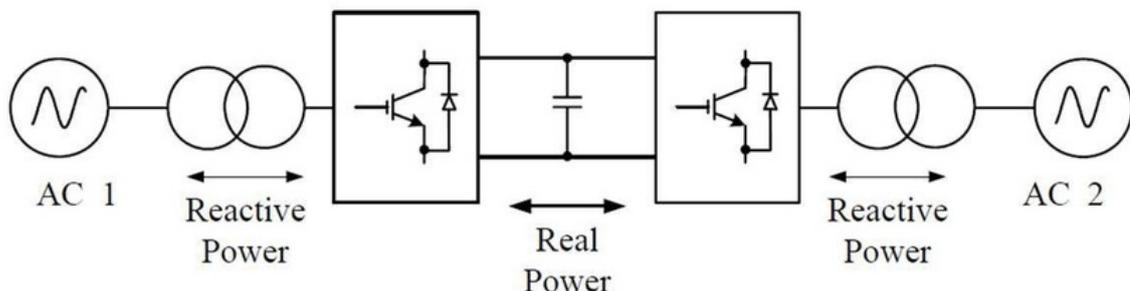
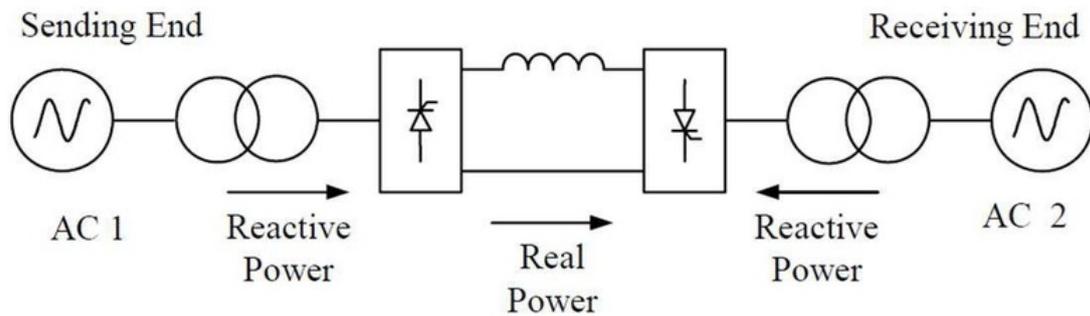


Figura 27 – Esquema básico de un línea HVDC VSC

2. **LCC (Line Commutated Converter o Convertidores Conmutados en Red):**

Es la tipología más antigua, basada en tiristores ya que, antes de evolucionar en materia de electrónica de potencia hasta donde hemos llegado, eran los únicos dispositivos capaces de controlar las cantidades de potencia que se querían transmitir.

Se puede observar un esquema básico de esta tecnología en la figura 28.



**Figura 28** – Esquema básico de un línea HVDC LCC

A continuación se realiza una comparación para resaltar las similitudes y diferencias más notables entre estas dos tecnologías:

1. Funcionamiento: Ambas actúan como una fuente de intensidad constante en el lado de DC.
2. Direccionamiento de la potencia: En ambas tecnologías es unidireccional.
3. Polaridad de la tensión: En ambas tecnologías cambia con el flujo de potencia.
4. Conmutación: En la tecnología LCC, la conmutación dentro de los convertidores viene definida por las tensiones y se requiere de bancos de condensadores para compensar la energía reactiva de las válvulas de conmutación.

Mientras que en la tecnología VSC no se necesita un sistema de conmutación por tensión.

5. Superficie: La tecnología LCC requiere de mucho espacio, debido principalmente a los filtros necesarios para limitar los armónicos y realizar un control de la energía reactiva.

Mientras que la tecnología VSC supone bajos requerimientos de espacio.

6. Potencia: Mientras que en la tecnología LCC los convertidores absorben potencia reactiva, en la tecnología VSC se realiza un control independiente de potencia activa y reactiva.

7. Pérdidas: La tecnología LCC se producen unas pérdidas de entorno al 0.8 % mientras que en la tecnología VSC están entorno al 1.6 %.

### 7.3. Generación de Corriente Continua

Para la exposición de este punto se ha dividido en dos partes diferenciadas: los elementos generadores y de almacenamiento, y las centrales eléctricas.

### 7.3.1. Elementos de Generación y Almacenamiento

Dentro de las principales formas de generar corriente continua se encuentran:

1. **Pilas:** Se pueden definir como un generador eléctrico que transforma la energía química en energía eléctrica, en forma de corriente continua.

El funcionamiento de una pila se puede resumir de la siguiente manera, si se sumergen dos barras de elementos químicos distintos (como por ejemplo zinc y carbón), llamados electrodos, en una disolución (de agua y ácido sulfúrico, por ejemplo) conocida como electrolito, se observa que el ácido ataca más rápidamente al zinc que al carbón, creándose así una diferencia de potencial entre los dos elementos. En la figura 29 se representan las partes fundamentales de una pila.

La pila seca o Leclanché, que supuso pasar de electrolitos líquidos o húmedos a secos, utiliza como electrolito una pasta que realiza las mismas funciones, pero con una eficacia superior a las húmedas.

La pila alcalina opera con, por ejemplo, una mezcla de zinc y dióxido de manganeso. Su eficiencia en circuitos de elevado consumo es muy superior al de otros tipos de pilas.

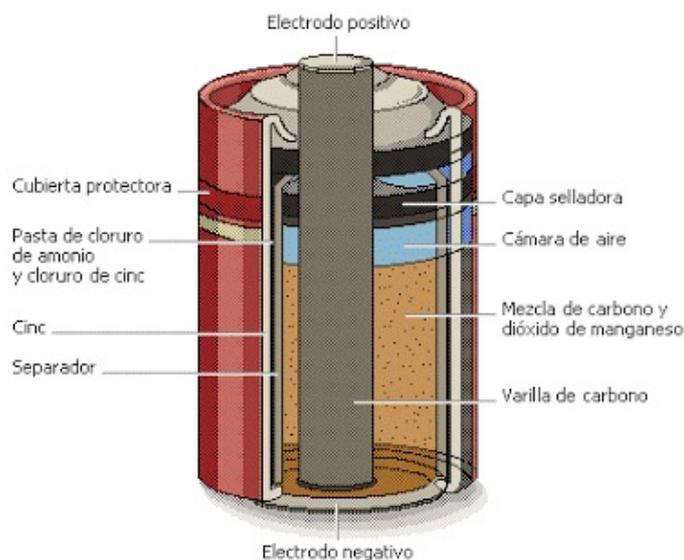
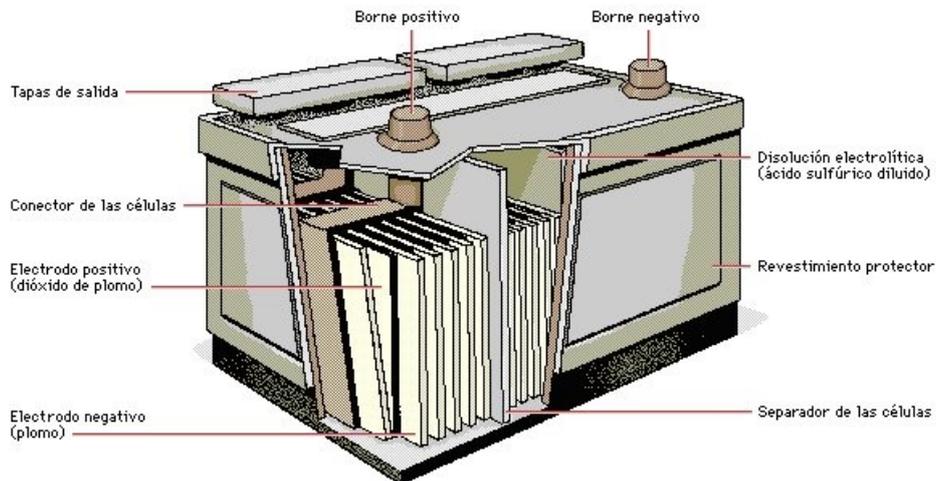


Figura 29 – Partes de una pila seca.

2. **Acumuladores:** Comúnmente conocidos como baterías. Como las pilas, transforman la energía química que se produce en su interior en energía eléctrica. Con la diferencia de que cuando se agota la sustancia que provoca la reacción química, se pueden recargar haciendo pasar a través de ellos una corriente continua. En la figura 30 se muestran las partes básicas de un acumulador clásico.

Entre los tipos de baterías se pueden destacar las de plomo-calcio, también llamadas baterías sin mantenimiento, ya que, teóricamente, sufren menor evaporación de agua del electrolito.

Otro tipo de batería a destacar son las de níquel-cadmio, tienen aspecto de pila, pero al ser recargables sustituyen a éstas en varios casos, como en las luces de emergencia. Pero las que destacan por su reciente avance y extendida utilización son las de Litio, presentes en los coches eléctricos.



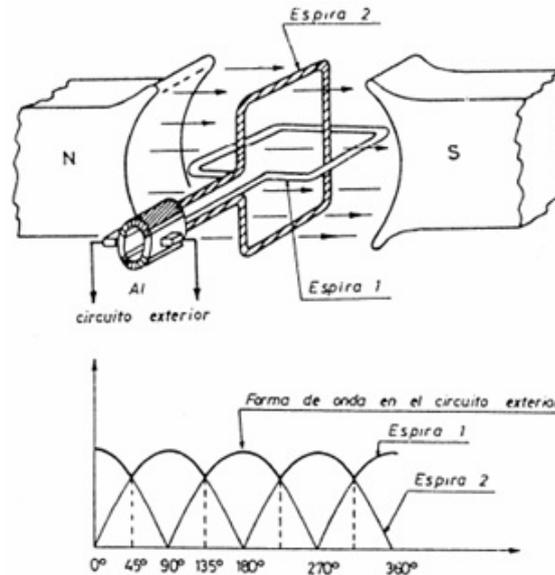
**Figura 30** – Partes de un acumulador.

3. **Dinamos:** Se pueden definir como máquinas eléctricas que producen energía eléctrica como corriente continua a partir de la inducción electromagnética. Formadas por un rotor y un estátor, haciendo girar una espira en un campo magnético, producen una fuerza electromotriz en sus conductores internos.

La tensión obtenida en el exterior a través de un anillo colector y de una escobilla tiene carácter senoidal.

Al conectar los extremos de una espira a unos semianillos conductores aislados entre sí, se consigue que las escobillas estén en continuo contacto con la parte del inducido que presenta una determinada polaridad. El anillo colector está dividido en delgas, que son unas láminas generalmente de cobre, aisladas entre sí y conectadas a su vez a los terminales de cada una de las espiras, que forman el denominado colector.

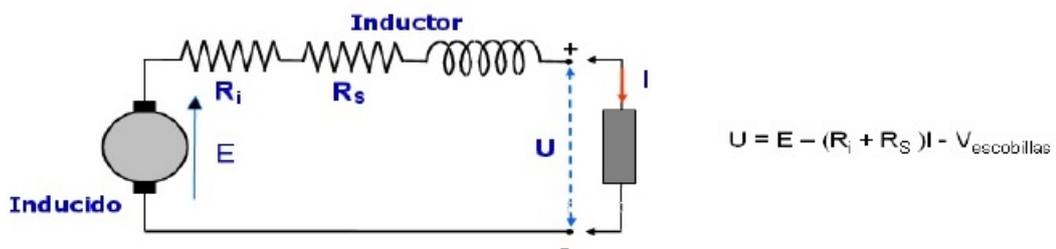
En la figura 31 vemos la forma de onda a la salida del colector de delgas.



**Figura 31** – Forma de onda a la salida del colector de delgas.

Se puede hacer la siguiente distinción:

- a) **Dinamos de excitación de serie:** El devanado inductor se conecta en serie con el inducido, haciendo así que fluya toda la corriente que el generador suministra a la carga por igual por ambos devanados. Por esto se diseñan con pocas espiras pero de gran sección. Como inconveniente cabe destacar su incapacidad de excitarse al trabajar en vacío. En la figura 32 se representa el esquema equivalente básico de este tipo de dinamos.

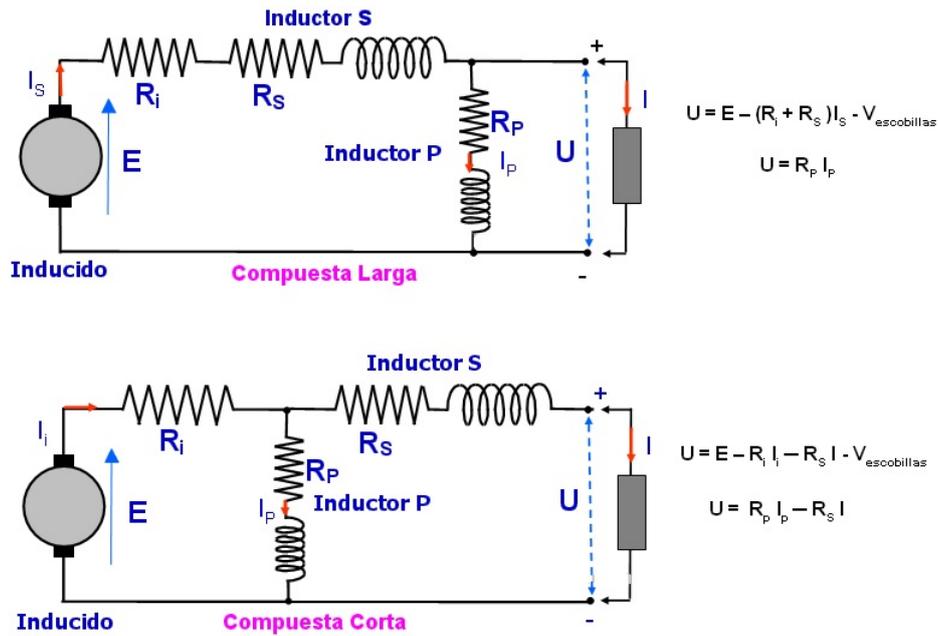


**Figura 32** – Representación esquemática de un dinamo con excitación en serie.

- b) **Dinamo con excitación mixta:** El circuito inductor se divide en dos partes independientes, conectando una en serie con el inducido y otra en derivación. Existen dos modalidades dentro de este grupo:

- 1) **Compuesta corta:** pone el devanado derivación directamente en paralelo con el inducido.
- 2) **Compuesta larga:** pone el devanado derivación en paralelo con el grupo formado por el inducido en serie con el otro devanado.

En la figura 33 se representa un esquema básico de los tipos de excitación compuesta nombrados anteriormente.

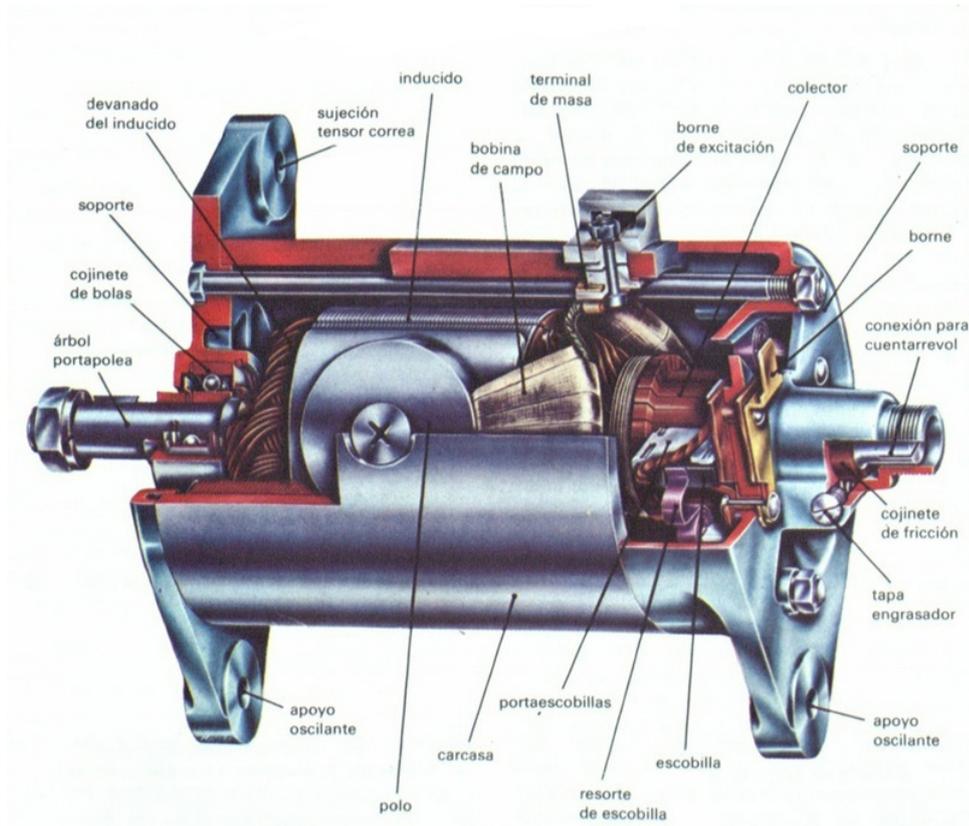


**Figura 33** – Representación esquemática de una dinamo con excitación compuesta corta (superior) y con excitación larga (inferior).

Mediante la combinación de los efectos serie y derivación en la excitación de la dinamo, se consigue que la tensión que suministra el generador a la carga sea estable para cualquier régimen de carga.

La casi estabilidad continua conseguida en la tensión hace que en la práctica sean las más utilizadas para la generación de energía eléctrica en forma de corriente continua.

Se pueden observar las partes de una dinamo en la figura 34.



**Figura 34** – Representación esquemática de una dinamo.

### 7.3.2. Centrales Eléctricas

Dentro de este punto se debe comentar que todas las centrales mencionadas en los antecedentes, en la parte de corriente alterna, podrían generar corriente continua si se cambiase el elemento generador correspondiente.

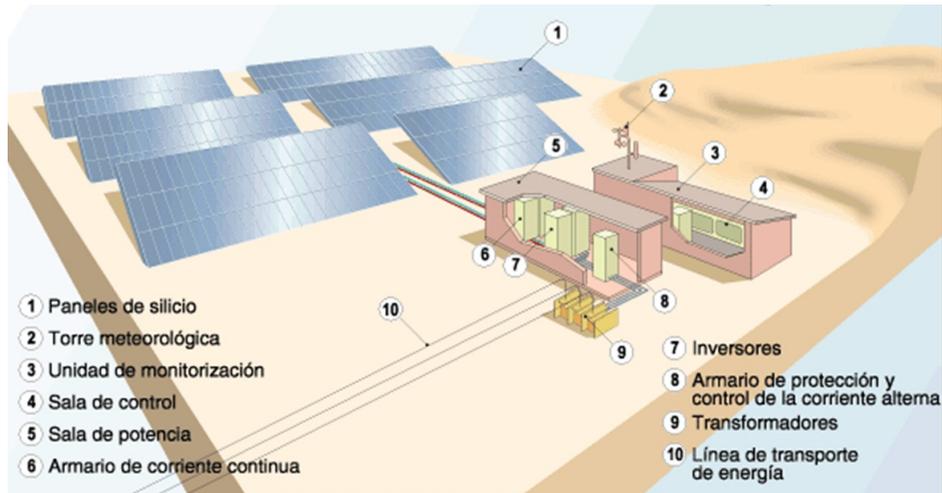
Como centrales puramente de generación de corriente continua se debe destacar un tipo de centrales, las solares fotovoltaicas, de las cuales se habla a continuación.

Son aquellas centrales que aprovechan la radiación solar para obtener energía eléctrica, la cual se puede obtener mediante el efecto fotovoltaico, figura 35.

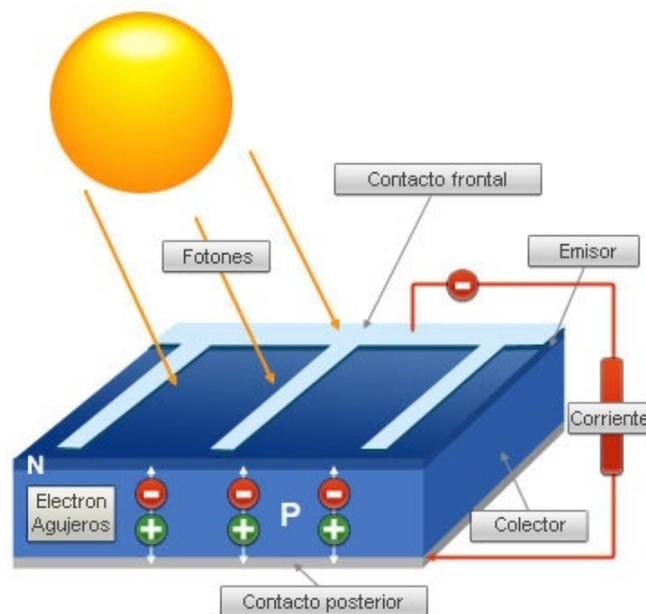
En este método se hace incidir la radiación proveniente del sol sobre un cristal semiconductor, conocido como célula solar, formadas por numerosas celdas fotovoltaicas que convierten la luz solar en electricidad.

Dependen del efecto fotovoltaico por el cual, la energía luminosa produce cargas positivas y negativas en dos semiconductores cercanos de diferente tipo, generando así un campo eléctrico que es capaz de generar una corriente eléctrica, como se representa en la figura 36.

Los materiales más típicos en estas células son el silicio cristalino y el arseniuro de galio. Los cristales de arseniuro de galio son creados específicamente para uso fotovoltaico, mientras que los de silicio se pueden adquirir en lingotes estándares más baratos, ya que se producen principalmente para el consumo de la industria de la microelectrónica.



**Figura 35** – Partes de una central solar fotovoltaica con células solares.



**Figura 36** – Esquema básico de una célula solar.

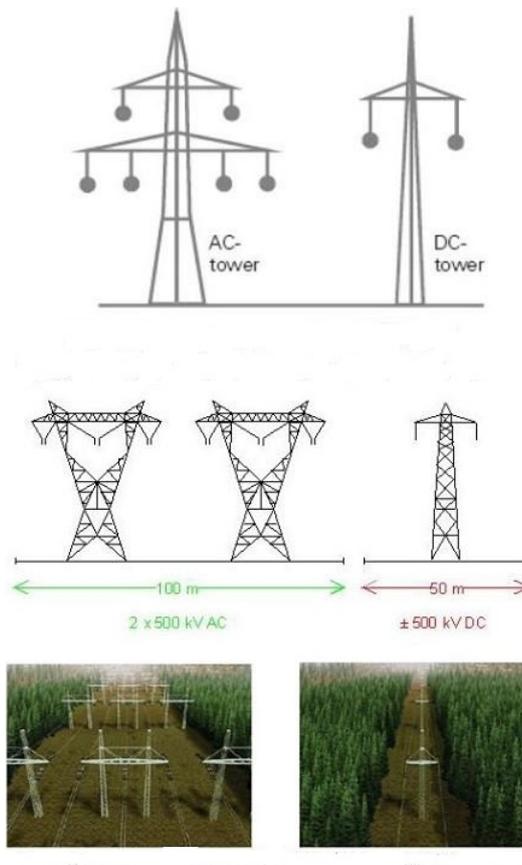
El resto de procesos de producción de energía eléctrica es similar al de las centrales termoeléctricas convencionales (previamente explicadas), a través de una turbina de vapor.

#### 7.4. Pérdidas en un sistema HVDC

Principalmente, en comparación con las pérdidas que se producen en un sistema HVAC, en un sistema HVDC las pérdidas van a ser menores, ya que en continua se utiliza normalmente dos cables, uno para el retorno, y en alterna tres.

Por este mismo hecho el impacto medioambiental de una línea de HVDC será mucho menor que el de una de HVAC, debido a que los apoyos de la misma son más pequeños y necesitan un paso de servidumbre menor, como se ve en la figura 37.

Esto también es debido a que en corriente continua el efecto pelicular es casi inexistente, por lo que los cables son de menor diámetro ya que tienen una superficie efectiva mayor.



**Figura 37** – Representación de los apoyos típicos para líneas HVAC y HVDC.

Como se aprecia en la figura 42, localizada en los resultados finales de este estudio, contrariamente a las líneas HVAC, las líneas HVDC empiezan a ser rentables a partir de cierta longitud. Esto es debido a que en el aspecto económico, referido a la instalación de subestaciones, es donde la tecnología HVDC se dispara frente a la HVAC.

Otro detalle a destacar es que las líneas de HVDC tienen una reactancia ínfima frente a las que presenta un sistema HVAC, por lo que las pérdidas debido a este efecto también serán notablemente más bajas.

## 7.5. Consumo en Corriente Continua

Desde hace unos años la restricción de sólo poder elevar la tensión de la corriente alterna hasta ciertos niveles para así mejorar su transporte, se ha visto cancelada por la continua mejora de semiconductores que se utilizan en los convertidores. Los principales son los convertidores buck, boost, buck-boost y cuk.

Se representan a continuación los dos más típicos, el convertidor boost (elevador), figura 38, y el convertidor buck (reductor), figura 39.

Estos convertidores realizan la operación de subir la tensión y de disminuirla, todo en co-

riente continua. Sus respectivas eficiencias se encuentran en torno al 90%, a partir de la fórmula general del rendimiento nombrada con anterioridad, la ecuación 5.

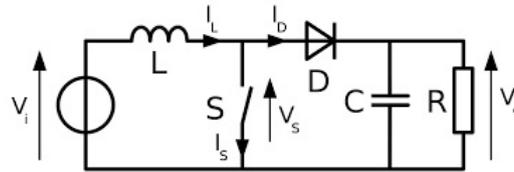


Figura 38 – Esquema básico de un elevador boost.

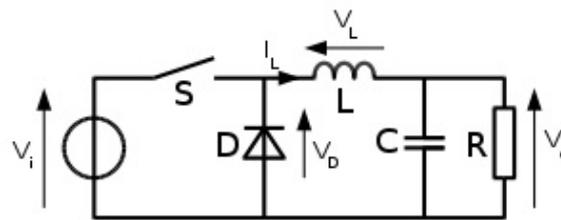


Figura 39 – Esquema básico de un reductor buck.

Todos los elementos que usen pilas o baterías se podrán clasificar como consumidores de corriente continua. También se pueden incluir aquí los aparatos que se conecten a la línea de alterna mediante un cargador o que poseen baterías recargables.

Normalmente cualquier aparato que base su funcionamiento en la electrónica consumirá corriente continua, tales como los smartphones, cámaras digitales, radio, ordenador portátil, televisión, motos, automóviles, etc.

## 8 Resultados finales

Para el desarrollo y exposición de los resultados finales obtenidos, se han agrupado en tres aspectos generales y diferenciados, presentados a continuación.

### 8.1. Aspecto Técnico

En el aspecto técnico de las líneas eléctricas cabe destacar lo siguiente:

1. **Estabilidad:** Como se ve en la ecuación 3, la reactancia es directamente proporcional a la longitud de la línea, por tanto en un sistema de transmisión HVAC se cumple que a mayor distancia a recorrer, se producen mayores pérdidas, como se refleja en la ecuación 2.

Sin embargo, las líneas de transmisión de HVDC no cuentan con este problema de la reactancia, y los límites de estabilidad se ven superados ya que no está relacionada con la distancia. Por lo que la estabilidad en un sistema HVDC se puede calcular mediante la ecuación 4.

Se puede intuir por lo tanto que en este apartado sale favorecida la tecnología HVDC.

2. **Asincronismo:** Cuando dos sistemas eléctricos de corriente alterna que trabajan a distinta frecuencia, uno a 50 Hz (zona europea y donde más haya influido la industria europea) y otro de 60 Hz (América y sus zonas de influencia), puede ser de utilidad e interés conectarlos, pudiéndose realizar dicha conexión mediante corriente continua.

Un ejemplo es la conexión del sistema eléctrico argentino y el brasileño en Garabí (2200 MW a 500 kV), como vemos en la figura 40.



**Figura 40** – Localización de la interconexión entre Argentina y Brasil

También cabe la posibilidad de que los dos sistemas eléctricos de corriente alterna trabajen a la misma frecuencia pero sigan distintas estrategias de regulación de frecuencia. En este caso, se puede contemplar como una posibilidad el conectarlos entre ellos mediante un sistema HVDC.

Un ejemplo de este caso de "NorNed", la conexión entre Noruega y Holanda (700 MW a 450 kV). En la figura 41 se muestra una localización aproximada.



**Figura 41** – Localización de la interconexión entre Noruega y Holanda

En este caso, saldría nuevamente favorecida la tecnología HVDC.

3. **Compensación de líneas:** Los sistemas de corriente alterna suministran dos formas de potencia, la potencia activa (denominada  $P$  y medida en  $W$ , que se convierte en trabajo mecánico, luz, calor, etc.) y la potencia reactiva (denominada  $Q$  y medida en  $VAR$ ), que puede ser la necesaria para circuitos inductivos (transformadores, motores, etc.) y la necesaria para circuitos capacitivos (capacidad de cables, condensadores de potencia, etc.). La potencia aparente (denominada  $S$  y medida en  $VA$ ) se puede definir como la suma de potencia que disipa el circuito ( $P$ ) y la potencia utilizada para la generación de campos eléctricos y magnéticos ( $Q$ ), lo que se traduce como la suma vectorial de las dos anteriores.

La relación entre la potencia activa y aparente se conoce como factor de potencia (f.d.p.), que entre más cercano esté al valor máximo posible (f.d.p = 1), mayor será el beneficio para el consumidor y el proveedor.

La energía reactiva es la que necesitan las bobinas y condensadores para poder funcionar. Al no existir cargas capacitivas en las líneas, la energía reactiva demandada y consumida se debe solamente a las bobinas, ubicadas en los inductivos de los motores, por ejemplo. Por eso siempre se habla de baterías de condensadores para compensar las bobinas presentes a lo largo de la línea, y acercar el f.d.p. a la unidad.

$$f.d.p = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Una mejora del factor de potencia influye directamente en la reducción de la sección de los conductores, menores pérdidas por efecto Joule en los cables y menores caídas de tensión en la línea.

También en las líneas de alterna es recomendable realizar la conversión de AC a DC para que no se produzcan unas pérdidas de potencias elevadas, debido a la reactancia en función de la longitud, como se explicó anteriormente.

Si la línea transportase desde el principio corriente continua, estas operaciones y las subestaciones destinadas a este fin serían diferentes, ya que si se produjese directamente en DC, la subestación de salida de la central sería un convertidor DC/DC para elevar la tensión a la de transporte. En el punto de consumo, si se consumiese directamente en DC, la subestación de final de línea sería otro convertidor DC/DC para adaptar la tensión de transporte a la de consumo.

Actualmente las líneas de transporte en HVDC disponen de convertidores AC/DC y DC/AC al principio y al final de la línea.

#### 4. **Control de flujo de potencia:**

En este punto juegan un papel fundamental los avances en la electrónica de potencia, ya que un sistema HVDC puede controlarse de una manera rápida, precisa y de forma segura el flujo de potencia activa que se entrega a un sistema.

Las operaciones de control se realizarían en las estaciones convertidoras, que se encontrarían a lo largo de la línea eléctrica.

#### 5. **Corrientes de cortocircuito:**

En corriente alterna siempre existe la posibilidad de que se generen cerca de la aparatada instalada en la línea, elevadas corrientes de cortocircuito.

En las líneas de corriente continua no es necesario la compensación de reactiva nombrada con anterioridad, y es la que contribuye a aumentar este fenómeno en el punto de conexión.

## 8.2. **Aspecto Medioambiental**

En general al instalar una línea eléctrica de alta potencia, los efectos medioambientales que se deberán tomar en cuenta, aparte del impacto visual, son los relacionados con el campo electromagnético, el efecto corona e iónico que generan ozono alrededor de los conductores, ruido e interferencias radiofónicas.

1. **Impacto Visual:** En HVAC se emplean como mínimo tres conductores y en HVDC normalmente dos, por lo que se necesita una menor resistencia mecánica en sus apoyos, lo que se puede traducir a apoyos más pequeños y la necesidad de una franja de servidumbre menor.

Se reproduce una idea de este punto en la figura 37.

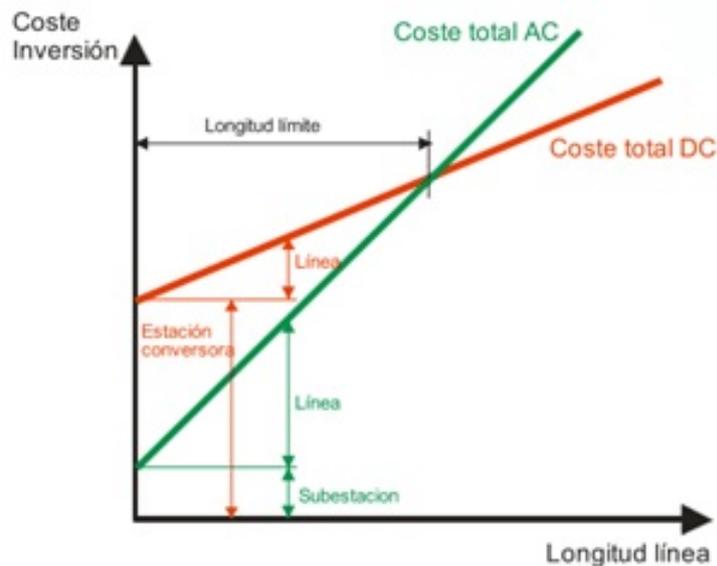
2. **Campo magnético:** El campo magnético cercano a las líneas de transmisión eléctrica es un poco más elevado que el que produce de manera natural nuestro planeta, por lo que no es preocupante en ninguno de los dos casos.

3. **Ionización del aire:** Causado por la aparición del efecto corona, generando con ello ozono, ruido e interferencias de radio frecuencia.

En los sistemas HVDC el efecto corona se reduce notablemente por utilizar menor número de conductores y porque depende directamente de la frecuencia, por lo que en los conductores se generará menos ozono y no se utilizarán tantas medidas para reducir estos efectos.

### 8.3. Aspecto económico

Para el desarrollo de este punto se han tenido en cuenta dos tipos de costes diferentes, que engloban el impacto económico de toda la instalación de la línea: los costes directos y los costes indirectos, ambos relacionados y recogidos en la figura 42, que también pone de manifiesto el concepto de distancia o longitud crítica.



**Figura 42** – Comparación de costes de un sistema HVAC frente a uno HVDC.

#### 8.3.1. Costes directos de la instalación

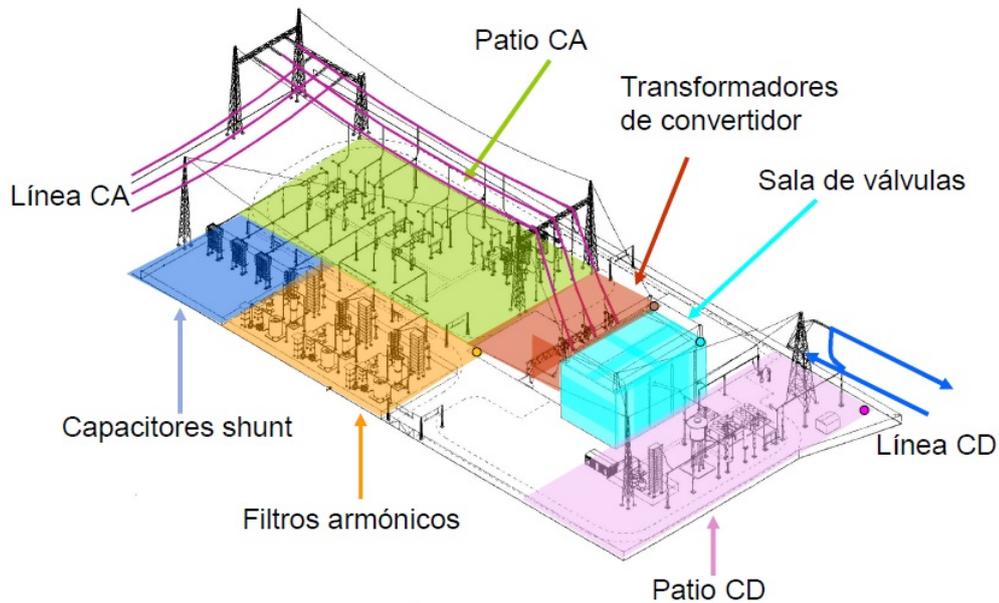
Son aquellos que suponen un gasto de capital, directamente relacionado con la instalación de la línea, como filtros, subestaciones, estaciones convertidoras, conductores, etc.

Para la transmisión de la misma cantidad de potencia, en las líneas HVDC únicamente se utilizan dos conductores, por lo que se requiere un menor número de elementos en el apoyo, lo que se traduce en un menor impacto económico.

En los sistemas HVDC se utilizan apoyos más reducidos y más compactos, lo que supondrá un paso de servidumbre más estrecho, lo que también supone un menor gasto.

Para realizar la conversión a corriente continua de la corriente producida en una central eléctrica, ya que normalmente ésta se obtiene en corriente alterna gracias a una máquina asíncrona, son necesarias las estaciones conocidas como estaciones convertidoras.

Estas estaciones son las que marcan un poco la diferencia en la representación de la figura 42, ya que supone dotar de instalaciones adicionales a la línea. En la figura 43 se representa una estación convertidora clásica.



**Figura 43** – Representación gráfica de una estación convertidora clásica.

A continuación se procede a comparar los elementos presentes una estación reductora o elevadora en AC con los elementos a mayores presentes en una estación convertidora clásica como la anterior.

En una estación elevadora o reductora de AC, encontramos las siguientes instalaciones:

1. **Transformador:** Dispositivo encargado de elevar o reducir la tensión de un nivel de entrada a otro distinto de salida, basándose en la inducción magnética.

Su mantenimiento se puede resumir en cuatro partes:

- a) Pruebas de aceite: Rigidez dieléctrica, análisis físico químico, etc.
  - b) Pruebas eléctricas: Relación de transformación, resistencia de devanados y aislamientos, etc.
  - c) Mantenimiento preventivo: Regeneración del aceite dieléctrico, lavado y secado de la parte activa, etc.
  - d) Mantenimiento correctivo: Cambio de bobinas o aceite dieléctrico
2. **Elementos de maniobra:** Como interruptores, que se pueden definir como los dispositivos que permiten desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica, o los seccionadores, que son componentes electromecánicos que permiten realizar la separación de aislamiento eléctrico entre el circuito eléctrico y su alimentación.

Entre el mantenimiento que necesitan se pueden destacar las pruebas de resistencia de los contactos, pruebas de aislamiento, verificación de apertura y cierre total, etc.

3. **Elementos de protección:** Como los fusibles, interruptores automáticos, etc., que se pueden definir como dispositivos de protección de las instalaciones eléctricas, líneas y receptores capaces de interrumpir un circuito ante una intensidad supere un determinado valor.

Necesitan un mantenimiento cada tres años, como pruebas de resistencia de aislamiento, de disparo por sobrecarga, de funcionamiento mecánico, etc.

Todos estos elementos se encuentran también en una estación convertidora AC/DC, figura 43, pero además cuentan con los siguiente elementos, que no están presentes en las estaciones elevadoras o reductoras comentadas anteriormente.

1. **Válvulas de tiristores:** Requieren de una inspección anual y mantenimientos cada dos años, aunque no es muy laborioso ya que disponen de sistemas avanzados de monitorización. Estos sistemas detectan la localización exacta de algún tiristor averiado y detienen las posibles fugas en el circuito de refrigeración.

Suelen tener dimensiones grandes en su conjunto, en torno a los 20 metros de alto y 20 toneladas de peso.

2. **Sistema de enfriamiento de válvulas:** Elemento de grandes dimensiones que cuenta con un equipo para quitar iones y otro para quitar oxígeno disuelto, contando también con sus controles y protecciones propias de cada equipo.

Requiere de un mantenimiento no muy exhaustivo como pueden ser inspecciones visuales, cambio de aceite o de filtros, reemplazo de la resina cambiadora de iones, etc.

3. **Capacitor:** El número de unidades necesarias es parecido a las de un banco de alterna, pero teniendo la resistencia de descarga de un valor en ohmios menor.

En dimensiones estos capacitores suelen ser más altos que los bancos de alterna.

4. **Resistencias para filtros de AC:** Determina la agudeza del filtro armónico y contienen un número de cajas metálicas conectadas en serie.

5. **Equipo de maniobra:** El equipo de maniobra en DC y en AC son iguales, solo que las funciones son ligeramente diferentes. Algunas secuencias son un poco más complicadas en DC, pero se ejecutan automáticamente.

### 8.3.2. Costes indirectos de la instalación

Son los relacionados con las pérdidas de potencia que se generan a lo largo de toda la línea de transmisión.

Como se explicó con anterioridad en este estudio, las líneas HVAC sufren la mayor parte de las pérdidas debido a la reactancia de la línea y a partir de cierta distancia, la denominada crítica o límite, a partir de la cual y debido a las pérdidas, un sistema HVDC es más rentable que uno HVAC, representado en la figura 42.

Las líneas eléctricas se pueden dividir en función del medio en el que se encuentren, lo que afectará a su longitud o distancia crítica:

1. **Líneas aéreas:** En este tipo de líneas la distancia crítica puede variar en un rango entre 400 y 700 km, a partir de aquí un sistema HVDC es más rentable que un sistema HVAC.
2. **Líneas subterráneas o submarinas:** Debido a las corrientes inductivas extremas presentes en los sistemas HVAC generan elevadas pérdidas e incluso llevan a los conductores a su límite térmico.

Esto reduce considerablemente la distancia crítica en este tipo de instalaciones, a partir de los 40 km un sistema HVAC genera mayores pérdidas que un sistema HVDC.

En el caso de líneas submarinas, la tecnología HVDC es la idónea ya que la capacitancia presente en la mayoría de los cables, en corriente continua, independientemente de otros factores, afecta a la instalación.

## 9 Orden de prioridad entre los documentos

- 1.- Memoria.
- 2.- Anexos.
- 3.- Presupuesto.



**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **ANEXOS**

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



## Índice del documento ANEXOS

<b>10 Asignación del Trabajo de Fin de Grado</b>	<b>61</b>
<b>11 Cálculos de una Línea Aérea</b>	<b>64</b>
11.1 Línea Aérea de Primera Categoría: 132 kV, 50 MW y 30 km . . . . .	64
11.1.1 Corriente Alterna . . . . .	65
11.1.2 Corriente Continua . . . . .	68
11.2 Línea Aérea de Categoría Especial: 420 kV, 360 MW y 50 km . . . . .	69
11.2.1 Corriente Alterna . . . . .	70
11.2.2 Corriente Continua . . . . .	72
11.3 Comparativa de datos obtenidos . . . . .	73



## **10 Asignación del Trabajo de Fin de Grado**



# ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

## ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

**En virtud de la solicitud efectuada por:**

*En virtud da solicitude efectuada por:*

**APELLIDOS, NOMBRE:** González Santos, Alejandro

*APELIDOS E NOME:*

**DNI:** [REDACTED] **Fecha de Solicitud:** Feb2018

*DNI: Fecha de Solicitude:*

**Alumno de esta escuela en la titulación de Grado en Ingeniería Eléctrica, se le comunica que la Comisión de Proyectos ha decidido asignarle el siguiente Trabajo Fin de Grado:**

*O alumno de esta escola na titulación de Grado en Enxeñería Eléctrica, comunícaselle que a Comisión de Proxectos ha decidido asignarlle o seguinte Traballo Fin de Grado:*

**Título T.F.G:** Estudio de la transmisión de alta potencia - Alterna vs. Continua

**Número TFG:** 770G02A171

**TUTOR:** (Titor) Casteleiro Roca, José Luis

**COTUTOR/CODIRECTOR:** Esteban Jove Pérez

**La descripción y objetivos del Trabajo son los que figuran en el reverso de este documento:**

*A descripción e obxectivos do proxecto son os que figuran no reverso deste documento.*

*Ferrol a Jueves, 14 de Junio del 2018*

Retirei o meu Traballo Fin de Grado o día \_\_\_\_ de \_\_\_\_ do ano \_\_\_\_\_

*Fdo: González Santos, Alejandro*

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO:**

El objeto de este Trabajo Final de Grado será el estudio de la transmisión de alta potencia en corriente continua (HVDC), destacando sus ventajas e inconvenientes en relación a la transmisión en corriente alterna (HVAC). El estudio incluirá no sólo la línea de transmisión de potencia, sino la posible implementación de todo el sistema en corriente continua, desde la generación hasta los puntos de consumo; tratando de dilucidar cual sería el modo de más eficiente.

**ALCANCE:**

- Estudio del funcionamiento básico de un sistema HVDC.
- Estudio de las pérdidas de un sistema HVAC.
- Estudio de las pérdidas de un sistema HVDC.
- Estudio de la generación de alta potencia en corriente alterna.
- Estudio de la generación de alta potencia en corriente continua.
- Estudio de los diferentes puntos de consumo en un sistema alimentado en corriente alterna.
- Estudio de los diferentes puntos de consumo en un sistema alimentado en corriente continua.
- Exposición de las principales conclusiones alcanzadas.

# 11 Cálculos de una Línea Aérea

En este punto se procede a calcular genéricamente las impedancias de una línea de transmisión en corriente alterna, para compararlas con sus homólogas en corriente continua, para proporcionar solidez a todo lo explicado anteriormente.

Se toma una línea de corriente alterna como referencia, debido a que hasta hoy en día es el método más utilizado y el que presenta desarrollos matemáticos conocidos.

Cabe destacar que todos los cálculos que se desarrollan a continuación están basados en el Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RLAT). En dicho reglamento, aparte de las restricciones y particularidades a tener en cuenta para el correcto diseño de una línea de transmisión eléctrica, define al principio una clasificación de las líneas eléctricas según tensión nominal:

1. **Categoría especial:** Tensión nominal igual o superior a 220 kV.
2. **Primera categoría:** Tensión nominal inferior a 220 kV y superior a 66 kV.
3. **Segunda Categoría:** Tensión nominal igual o inferior a 66 kV y superior a 30 kV.
4. **Tercera Categoría:** Tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superior a 1 kV

## 11.1. Línea Aérea de Primera Categoría: 132 kV, 50 MW y 30 km

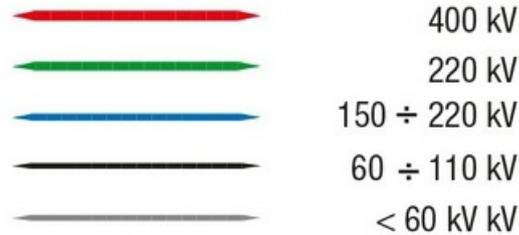
La línea sobre la que se basan los siguientes cálculos, será la que sale de la central térmica de As Pontes de García Rodríguez (2421 MW), y alimenta la industria siderúrgica de Megasa S.L., en Narón y la zona de Ferrolterra asociada.

Para conocer la categoría de la línea y poder así comenzar los cálculos, es necesario buscar el mapa en la Red Eléctrica Española, de donde se han extraído las figuras 44 y 45.



**Figura 44** – Localización geográfica línea de transmisión entre la central de As Pontes y Megasa S.L.

## Tensiones - Tensões



**Figura 45** – Leyenda tensiones nominales Red Eléctrica Española.

Como se indica en la leyenda anterior, tomamos la tensión normalizada de 132 kV como la tensión nominal de nuestra línea de referencia (ITC-LAT 07, Tabla 1).

Para la simplificación de los cálculos se supondrá un factor de potencia de 0.85 en una línea de configuración en capa con apoyos de celosía y armados, que son los más utilizados para este tipo de líneas.

Se supondrá para ambas líneas una distancia entre conductores de 5 metros, para cálculos de DMG (Distancia Media Geométrica) y RMG (Radio Medio Geométrico), y la transmisión de una potencia activa máxima de 50 MW.

En corriente alterna se supondrá un sistema trifásico de circuito simple, un conductor por fase, y en corriente continua un sistema monopolar con retorno metálico.

### 11.1.1. Corriente Alterna

A continuación se procede a comprobar si este tipo de conductor cumple la restricción del límite térmico, para lo cual es necesario saber todas las características de los conductores, recogidas en la figura 46, y los siguientes cálculos.

CONDUCTORES DE ALUMINIO-ACERO										NORMA UNE 21018		
Denominación	Sección trans.			Equiv.Cu.	N° de alambres y diám.		Diám. ext.	Peso unitario			Carga de rotura	Resist. eléct. a 20°C
	mm² Aluminio	mm² Acero	mm² Total		N°x mm Aluminio	N°x mm Acero		kg/km Aluminio	kg/km Acero	kg/km Total		
LA- 30	26,7	4,4	31,1	17	6X2,38	1X2,38	7,14	73,2	34,7	107,9	9,90	1,0794
LA- 56	46,8	7,8	54,6	30	6X3,15	1X3,15	9,45	128,3	60,8	189,1	16,40	0,6136
LA- 78	67,4	11,2	78,6	42	6X3,78	1X3,78	11,34	185,0	87,0	272,0	23,10	0,4261
LA-110	94,2	22,0	116,2	60	30X2,00	7X2,00	14,00	260,4	172,3	433,0	43,10	0,3066
LA-145	119,3	27,8	147,1	75	30X2,25	7X2,25	15,75	330,0	218,0	548,0	54,10	0,2422
LA-180	147,3	34,3	181,6	93	30X2,50	7X2,50	17,50	407,0	269,0	676,0	63,90	0,1962
LA-280	241,7	39,4	281,1	152	26X3,44	7X2,68	21,80	667,0	310,0	977,0	84,50	0,1194
LA-380	337,3	43,7	381,0	212	54X2,82	7X2,82	25,38	932,0	343,0	1.275,0	106,50	0,0857
LA-455	402,3	52,2	454,5	253	54X3,08	7X3,08	27,72	1.112,0	409,0	1.521,0	124,00	0,0718
LA-545	484,5	62,8	547,3	305	54X3,38	7X3,38	30,42	1.340,0	492,0	1.832,0	148,50	0,0596
LA-635	565,0	71,6	636,6	365	54X3,65	19X2,19	32,85	1.562,0	563,0	2.125,0	175,00	0,0511

**Figura 46** – Características de conductores aéreos.

$$P = 3 \cdot V_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad (11)$$

Donde  $V_f$  e  $I_f$  son valores de fase, por lo que obtenemos lo siguiente.

$$I_f = \frac{50 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,85} = 257,29(A) \quad (12)$$

El conductor real de la línea es un LA-280, como se puede leer en el DOG número 16 del 23 de enero de 2009, cuyas características más importantes se recogen a continuación.

DENOM.	SECCIÓN	COMPOSICIÓN (Al+Ac)	DIÁMETRO	$R_k$ ELECTR. A 20°C
LA-280	281,1 mm <sup>2</sup>	26+7	21,80 mm	0,1194 $\frac{\Omega}{km}$

**Tabla 1** – Características LA-280.

Escogemos en la tabla 11 de la ITC-LAT 07 una sección de 250(mm<sup>2</sup>), ya que la sección del conductor reflejada en la tabla anterior, se encuentra entre la secciones teóricas de 250 y 300(mm<sup>2</sup>), a la que le corresponde una densidad de corriente de  $\rho_{corriente} = 2,30(\frac{A}{mm^2})$ .

Se comprueba que dicha sección teórica cumple el límite térmico, es decir, que la densidad de corriente con la intensidad anteriormente calculada, sea menor que la teórica.

$$\rho_{corriente} = \frac{257,29}{250} = 1,029(\frac{A}{mm^2}) \quad (13)$$

Se realiza una interpolación entre las secciones teóricas de 250 y 300 mm<sup>2</sup>, y la sección real del LA-280, que es de 281,1 mm<sup>2</sup>.

$$\frac{300 - 281,1}{300 - 250} = \frac{2,15 - X}{2,15 - 2,3} \dots X = 2,2067(\frac{A}{mm^2}) \quad (14)$$

A esta densidad de corriente, según la ITC-LAT 07, se le debe aplicar un coeficiente de corrección en función de la composición del conductor. En este caso el LA-280 se compone de 26 hilos de aluminio y 7 hilos de acero, por lo que le corresponde un coeficiente corrector de 0,937, que se aplica en el siguiente cálculo:

$$\rho_{corriente_{LA-280}} = 2,2067 \cdot 0,937 = 2,067(\frac{A}{mm^2}) \quad (15)$$

Vemos que es inferior a la densidad de corriente teórica por lo que cumple la restricción del límite térmico.

De todas formas es necesaria otra comprobación, esta vez calculando la densidad de corriente de nuestro conductor en función de la intensidad que circulará por una fase.

$$\rho_{corriente_{LA-280}} = \frac{257,29}{281,1} = 0,915(\frac{A}{mm^2}) \quad (16)$$

Cumple las restricciones de límite térmico, por lo que los conductores de sección superiores también las cumplen.

Los próximos cálculos son necesarios para estimar la caída de tensión por unidad de longitud mediante el valor de la resistencia, reactancia y capacitancia por unidad de longitud de

la propia línea.

En primer lugar se calculan la distancia media geométrica entre conductores y el radio medio geométrico de dichos conductores, necesarios para el cálculo de la reactancia de la línea.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{5 \cdot 5 \cdot 10} = 6,3(m) \quad (17)$$

$$RMG = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} = \frac{21,80}{2} \cdot 0,779 = 8,49(mm) \quad (18)$$

Siendo  $r$  el radio del conductor que vamos a utilizar.

La resistencia por unidad de longitud estará relacionada con la resistencia eléctrica máxima del cable a 20°C.

$$R_k = R_{20^\circ C} = 0,1194\left(\frac{\Omega}{km}\right). \quad (19)$$

Como se aprecia en la figura 46, la resistencia eléctrica está relacionada con la sección, a mayor sección menor resistencia eléctrica.

La reactancia por unidad de longitud se calcula de la siguiente manera:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{8,49}\right) = 1,32 \cdot 10^{-3}\left(\frac{H}{km}\right). \quad (20)$$

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,32 \cdot 10^{-3} = 0,415\left(\frac{\Omega}{km}\right). \quad (21)$$

Esta reactancia es la que provoca las mayores pérdidas de potencia en una línea de transmisión de energía eléctrica en corriente alterna, explicadas con anterioridad en este TFG.

La capacitancia de la red se calcula del siguiente modo:

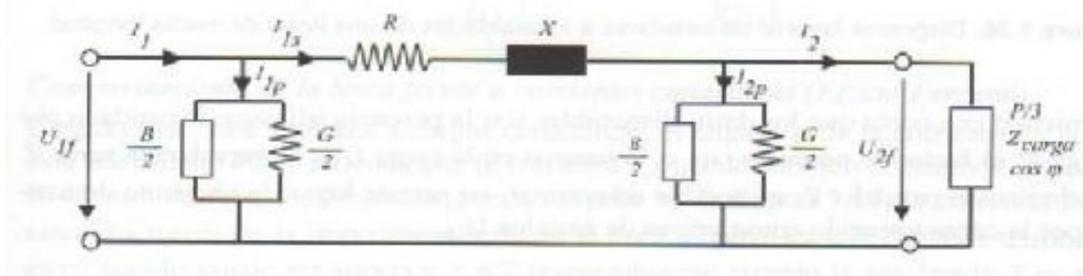
$$C = \frac{24,2 \cdot 10^{-9}}{\log \frac{DMG}{RMG}} = \frac{24,2 \cdot 10^{-9}}{\log \frac{6,3 \cdot 10^3}{8,49}} = 9,42 \cdot 10^{-9}\left(\frac{F}{km}\right). \quad (22)$$

A continuación se calcula la susceptancia, mediante la siguiente ecuación:

$$B_k = \omega \cdot C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 9,42 \cdot 10^{-9} = 2,96 \cdot 10^{-6}\left(\frac{S}{km}\right). \quad (23)$$

La conductancia  $G$  se puede definir como la propiedad inversa de la  $R_k$  del conductor. Se mide en Siemens, como la susceptancia, y normalmente se desprecia en estos cálculos.

En la figura 47 se representa un esquema básico de una línea de transmisión eléctrica donde se distribuyen y detallan los elementos anteriormente calculados.



**Figura 47** – Circuito eléctrico equivalente de una línea de transmisión eléctrica en corriente alterna.

Se calcula a continuación la caída de tensión por unidad de longitud.

$$M = P \cdot l = \Delta U \cdot \frac{U^2}{l \cdot (R_k + X_k \cdot \tan(\varphi))} \quad (24)$$

Donde  $l$  es la longitud del tramo o línea.

De la anterior ecuación se obtiene la siguiente expresión para la caída de tensión:

$$\frac{\Delta U}{l^2} = \frac{50 \cdot 10^6}{\frac{(132 \cdot 10^3)^2}{0,1194 + 0,415 \cdot \tan(\cos^{-1}(\varphi))}} = 1,081 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\%}{\text{km}^2} \right) \quad (25)$$

Esta relación de la caída de tensión con la longitud de la línea o tramo, es una relación cuadrática, no lineal.

Como se indica al principio de este punto, la línea a diseñar mide 30 km, por lo que en AC se tendrá una caída de tensión de  $\Delta U_{AC} = 0,973(\%)$ . Lo que supone una caída de tensión de  $\Delta U = 1284,36(V)$ .

### 11.1.2. Corriente Continua

En corriente continua se han aplicado la misma tensión y la misma potencia a transmitir, obviando las partes de la reactancia y la capacitancia de la línea, ya que no ha lugar en este tipo de corriente, y por consiguiente las ecuaciones 20 y 21 serán  $0(\frac{H}{km})$  y  $0(\frac{\Omega}{km})$ , respectivamente.

$$P = V \cdot I \quad (26)$$

La intensidad que circulará por el conductor será:

$$I = \frac{50 \cdot 10^6}{132 \cdot 10^3} = 378,79(A) \quad (27)$$

siguiendo los procedimientos planteados en AC, cogemos una sección teórica de  $300 \text{ mm}^2$ , que tendrá una  $\rho_{corriente} = 2,15(\frac{A}{\text{mm}^2})$ . Se escoge la siguiente sección respecto al caso anterior, ya que circula un poco más de corriente.

Se utilizará el conductor LA-380, en la siguiente tabla se recogen sus características más importantes.

DENOM.	SECCIÓN	COMPOSICIÓN (Al+Ac)	DIÁMETRO	$R_k$ ELECTR. A 20°C
LA-380	337,3 mm <sup>2</sup>	54+7	21,80 mm	0,0857 $\frac{\Omega}{km}$

**Tabla 2** – Características LA-380.

Se necesita comprobar que la anterior  $\rho_{corriente}$  sacada de la tabla es mayor que la necesaria en este caso:

$$\rho_{corriente} = \frac{818,8}{500} = 1,64 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (28)$$

Al ser menor se puede continuar los cálculos con una interpolación para el cálculo para obtener de la  $\rho_{corriente_{LA-380}}$ :

$$\frac{400 - 337,3}{400 - 300} = \frac{1,95 - X}{1,95 - 2,15} \dots X = 2,0754 \frac{A}{mm^2} \quad (29)$$

Debemos aplicarle el coeficiente de corrección pertinente a su composición, 54+7, de 0,95.

$$\rho_{corriente_{LA-380}} = 2,0754 \cdot 0,95 = 1,97 \frac{A}{mm^2} \quad (30)$$

El conductor seleccionado cumple las restricciones impuestas por el límite térmico, por lo que se continúan los cálculos con la caída de tensión.

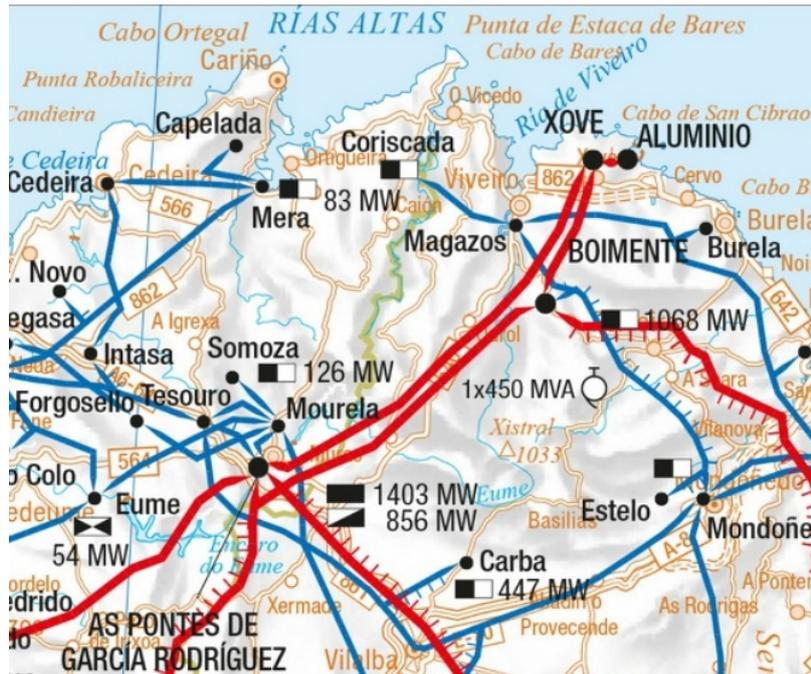
Como no existen reactancias, sólo aparecerá la  $R_k = 0,0857 \left( \frac{\Omega}{km} \right)$ , recogida en la figura 46, dejando el cálculo de la caída de tensión por unidad de longitud muy simplificado:

$$\frac{\Delta U}{l^2} = \frac{50 \cdot 10^6}{\frac{(132 \cdot 10^3)^2}{0,0857}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\%}{km^2} \right) \quad (31)$$

Como se indica al principio de este punto, la línea mide 30 km, por lo que tendremos en DC una caída de tensión de  $\Delta U_{DC} = 0,225 \%$ , lo que se traduce como una caída de tensión de  $\Delta U_{DC} = 297V$ .

## 11.2. Línea Aérea de Categoría Especial: 420 kV, 360 MW y 50 km

La línea sobre la que se basan los siguientes cálculos, será la que sale de la central térmica de As Pontes de García Rodríguez (2421 MW), y alimenta la industria Alcoa, en San Ciprián, Lugo. Se puede ver la localización geográfica de esta línea en la figura 48.



**Figura 48** – Localización geográfica línea de transmisión entre la central de As Pontes y la industria de Alcoa en San ciprián, Lugo.

Mirando en la leyenda de la figura 45, vemos que el color rojo significa que la línea tiene una tensión nominal de 440 kV.

Para la simplificación de los cálculos se supondrá un factor de potencia de 0.85 en una línea de configuración en capa con apoyos de celosía y armados, que son los más utilizados para este tipo de líneas.

Se supondrá para ambas líneas una distancia entre conductores de 5 metros, para cálculos de DMG (Distancia Media Geométrica) y RMG (Radio Medio Geométrico), y la transmisión de una potencia activa máxima de 360 MW.

En corriente alterna se supondrá un sistema trifásico de circuito simplex, un conductor por fase, y en corriente continua un sistema monopolar con retorno metálico.

El procedimiento del cálculo para elegir el conductor, como del límite térmico y como el de la caída tensión, serán iguales que en la línea de 132 kV, simplemente cambiando la tensión nominal a 440 kV y la potencia máxima a 360 MW.

### 11.2.1. Corriente Alterna

Mediante la ecuación 12, en este caso circularán por cada fase de:

$$I_f = \frac{P}{3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi)} = 555,74(A) \quad (32)$$

Por lo que partiremos de la tabla 11 de la ITC-LAT 07 con una sección de  $400\text{mm}^2$ , que tendrá una  $\rho_{\text{corriente}} = 1,95\left(\frac{A}{\text{mm}^2}\right)$ .

Interpolando igual que en la ecuación 14, se obtiene:

$$\rho_{corriente_{LA-455}} = 1,87 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (33)$$

Se puede sacar como conclusión que el conductor LA-455, vemos que coincide con el propuesto en el BOE-B-2005-225062, y cuyas características principales se recogen en la siguiente tabla.

DENOM.	SECCIÓN	COMPOSICIÓN (Al+Ac)	DIÁMETRO	$R_k$ ELECTR. A 20°C
LA-455	454,5 mm <sup>2</sup>	54+7	27,72 mm	0,0718 $\frac{\Omega}{km}$

**Tabla 3** – Características LA-455.

Una vez aplicado el factor de corrección debido a la composición del conductor, de 0,95, y utilizando la ecuación 15:

$$\rho_{corriente_{LA-455}} = 1,77 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (34)$$

Es menor a la teórica calculada anteriormente, por lo que está dentro de las restricciones del límite térmico.

Se realiza la última comprobación. Igual que en el caso de 132kV, siguiendo la ecuación 16, vemos que:

$$\rho_{corriente_{LA-455}} = 1,22 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (35)$$

Sigue siendo menor que la teórica seleccionada del RLAT, por lo que cumple las restricciones del límite térmico.

Se continua con los cálculos para determinar la caída de tensión que sufriría la línea con este conductor.

Mediante la ecuación 17 obtenemos:

$$DMG = \sqrt[3]{5 \cdot 5 \cdot 10} = 6,3(m) \quad (36)$$

Y mediante la ecuación 18:

$$RMG = r \cdot \epsilon^{-\frac{1}{4}} = 10,8(mm) \quad (37)$$

Ambos datos son necesarios para los siguientes cálculos.

Vemos en la tabla anterior que la  $R_{k_{LA-455}}$  es de 0,0718  $\left(\frac{\Omega}{km}\right)$ , y usando las ecuaciones 20 y 21 obtenemos:

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (2 \cdot 10^{-4} \cdot \log\left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{10,8}\right)) = 0,4 \left(\frac{\Omega}{km}\right) \quad (38)$$

Para completar los datos del circuito equivalente, figura 47, se necesitan las ecuaciones 22 y 23:

$$B_k = \omega \cdot C = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left(\frac{24,2 \cdot 10^{-9}}{\frac{6,3 \cdot 10^3}{10,8}}\right) = 2,75 \cdot 10^{-6} \left(\frac{S}{km}\right) \quad (39)$$

Por último se calcula la expresión de la caída de tensión por unidad de longitud de esta línea,

mediante la ecuación 25, y es del orden de:

$$\frac{\Delta U}{l^2} = 0,6 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\%}{km^2} \right) \quad (40)$$

Por lo que, para este caso que la línea mide 50 km, se tendrá en AC una caída de tensión de,  $\Delta U_{AC} = 1,5(\%)$  lo que supone,  $\Delta U_{AC} = 6600(V)$ .

### 11.2.2. Corriente Continua

Tomando como referencia lo calculado anteriormente, con la ecuación 27 obtenemos:

$$I = \frac{P}{3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi)} = 818,18(A) \quad (41)$$

Para la que se escogerá, del RLAT, una sección teórica de  $500mm^2$  a la que le corresponde una  $\rho_{corriente}$  de  $1,80 \left( \frac{A}{mm^2} \right)$ .

Mediante la ecuación 28, se obtiene una

$$\rho_{corriente} = 1,64 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (42)$$

Y se observa que es menor que la teórica obtenida en el RLAT.

Debido a la magnitud de la corriente que tiene que circular, se elige el conductor LA-545, con las siguientes características:

DENOM.	SECCIÓN	COMPOSICIÓN (Al+Ac)	DIÁMETRO	$R_k$	ELECTR. A 20°C
LA-545	547,3 mm <sup>2</sup>	54+7	30,42 mm		0,0596 $\frac{\Omega}{km}$

Tabla 4 – Características LA-545.

Se realiza una interpolación, ecuación 29, calculando:

$$\rho_{corriente_{LA-545}} = 1,73 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (43)$$

A esta densidad de corriente se le debe de aplicar el coeficiente corrector debido a su composición, de 0,95 y mediante la ecuación 30:

$$\rho_{corriente_{LA-545}} = 1,64 \left( \frac{A}{mm^2} \right) \quad (44)$$

Se puede afirmar que el conductor LA-545 cumple las restricciones del límite térmico.

Como es un caso de DC, no existen reactancias. Este hecho, junto al dato del catálogo de  $R_{k_{LA-545}} = 0,0596 \frac{\Omega}{km}$ , y mediante la ecuación 30, se obtiene la expresión:

$$\frac{\Delta U}{l^2} = 1,1 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\%}{km^2} \right) \quad (45)$$

Para este caso, que la línea mide 50 km, en DC se tendrá una caída de tensión de  $\Delta U_{DC} =$

0,28 %, lo que supone una caída de tensión de  $\Delta U_{DC} = 1210V$ .

### 11.3. Comparativa de datos obtenidos

Los datos obtenidos en el anexo anterior se recogen en la siguiente tabla:

	132 kV		440 kV	
	AC	DC	AC	DC
$R_k(\frac{\Omega}{km})$	0,1194	0,0857	0,0718	0,0596
$X_k(\frac{\Omega}{km})$	0,415	∅	0,4	∅
$B_k(\frac{S}{km})$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	∅	$2,75 \cdot 10^{-6}$	∅
$\frac{\Delta U}{l^2}(\frac{\%}{km^2})$	$1,081 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
$\Delta U(\%)$	0,973	0,225	1,5	0,28
$\Delta U(V)$	1284,36	297	6600	1210

**Tabla 5** – Datos obtenidos.

En ambas líneas el paso a DC supone una importante reducción de las pérdidas, sobre todo en el caso de la línea de 440 kV, donde se puede apreciar que las pérdidas en DC son ínfimas.

Como conclusión de este anexo se puede decir que, en función de las caídas de tensión obtenidas, la tecnología HVDC es mucho más rentable que la tecnología HVAC.



**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **PLIEGO DE CONDICIONES**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



## Índice del documento PLIEGO DE CONDICIONES

**12 Pliego de Condiciones**

**79**



## 12 Pliego de Condiciones

El Pliego de Condiciones no ha lugar por tratarse de un estudio meramente teórico.



**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **ESTADO DE MEDICIONES**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



## Índice del documento MEDICIONES

**13 Estado de Mediciones**

**85**



## 13 Estado de Mediciones

Para la realización de este estudio se ha necesitado el siguiente listado de tiempos:

**1. Recopilación de información:**

Búsqueda y selección de información perteneciente a los campos que abarca este TFG.

**2. Estudio de la información:**

Comprensión y estudio de la información seleccionada para proceder a su explicación.

**3. Diseño de la estructura y elaboración del estudio:**

Estructuración y desarrollo del presente TFG.

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad (horas)</b>
Recopilación de la información	150
Estudio de la información	50
Diseño y elaboración	45
<b>TOTAL</b>	<b>245</b>

**Tabla 6** – Estado de Mediciones.



**TÍTULO: ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE ALTA POTENCIA  
ALTERNA vs. CONTINUA**

---

# **PRESUPUESTO**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2018**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ALEJANDRO GONZÁLEZ SANTOS**



## Índice del documento PRESUPUESTO

**14 Precios unitarios de mano de obra**

**91**



## 14 Precios unitarios de mano de obra

Concepto	Cantidad (horas)	Precio (€/hora)	Total (€)
Recopilación de la información	150	35	5250,00
Estudio de la información	50	35	1750,00
Diseño y elaboración del estudio	45	35	1575,00
<b>TOTAL</b>	<b>245</b>		<b>8575,00</b>
<b>TOTAL (I.V.A.)</b>		<b>21 %</b>	<b>10375,75</b>

**Tabla 7** – Presupuesto mano de obra.