

# TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA.

Gómez Francisco, Guamán Telmo, Quizhpi Mateo, San Martín Cristhian.

*fgomezj@est.ups.edu.ec, tguamane@est.ups.edu.ec, fquizhpic@est.ups.edu.ec, csanm@est.ups.edu.ec*

Universidad Politécnica Salesiana  
Facultad de Ingenierías. Ingeniería Eléctrica.  
*Sistemas Eléctricos de Potencia I.*

**Resumen**—En los últimos años los sistemas de transmisión en corriente directa se están convirtiendo en una alternativa frente a los sistemas en corriente alterna debido a las ventajas que ofrece sobre estos y gracias a la creciente mejora de los dispositivos dentro de la electrónica de potencia, que incrementa las prestaciones del sistema. Es por ello que en el presente trabajo se analizarán dichos sistemas describiendo los elementos que los conforman, las diferentes configuraciones y tecnologías; explicando su funcionamiento.

**Index Terms**—Neumática

## I. INTRODUCCIÓN.

El diseño de un sistema de transmisión busca transmitir la mayor cantidad de potencia con las menores pérdidas, la menor caída de tensión y los menores costos asociados con los equipos y el mantenimiento. [1] En este sentido se han desarrollado nuevas tecnologías que han mejorado sustancialmente estos aspectos tales como los sistemas de transmisión en corriente directa, los FACTS, transformadores de mayor eficiencia, mejores aislamientos y utilización de superconductores entre otras. [2] Existen otros factores que influyen en el diseño como lo son el incremento de los costos de los terrenos de servidumbre para la construcción de líneas de transmisión, la imposibilidad de construir nuevas líneas aéreas en las grandes ciudades y las consideraciones medioambientales. Además de esto, se busca obtener beneficios adicionales como el mejoramiento de la estabilidad del sistema de potencia y la reducción de armónicos. [3] Los sistemas de transmisión en corriente directa surgen como una solución a muchos de estos aspectos, siendo así de gran importancia el análisis de su funcionamiento y configuración.

## II. TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA.

Los sistemas de transmisión en corriente directa se presentan como una solución a muchos de los problemas presentes en la transmisión en CA, debido a las ventajas que ofrece, tales como la flexibilidad en el manejo de la potencia entregada, la interconexión de sistemas de diferentes frecuencias de operación sin necesidad de sincronismo, la transmisión de potencia a través de grandes distancias con pocas pérdidas y sin problemas de estabilidad. [3] Otros beneficios en referencia al sistema en ca es la reducción de pérdidas en la línea DC, ya que al no presentarse el efecto piel utiliza todo el área del conductor permitiendo transmitir mayor cantidad de potencia en comparación con un sistema AC. La caída de tensión que se presenta en la línea DC es de tipo resistiva de menor magnitud que la caída de tensión de tipo inductiva y resistiva que se presenta en AC. [1-2]

## III. INTERCONEXIÓN EN CORRIENTE CONTINUA (HVDC). (PDF 1)

Una interconexión entre sistemas con distintas frecuencias sólo es posible con HVDC. Pero ésta es solo una de las tantas aplicaciones donde HVDC es una mejor solución, tanto técnica como económicamente. [4] Algunos casos a ser considerados:

- Cuando no es posible o deseable coordinar el control de frecuencia de dos sistemas.
- Cuando pudiera ser difícil de obtener operación estable usando una interconexión con HVAC, ó si se desea mejorar los márgenes de estabilidad de los sistemas.
- Cuando la distancia a transmitir supera la distancia donde el HVDC es más económico que HVAC.
- Cuando la interconexión se realiza con cables submarinos.
- Cuando líneas aéreas no son aceptadas y es necesario usar cables subterráneos de longitud considerable.

## IV. NIVEL DE TENSIÓN Y POTENCIA ACTIVA

El nivel de voltaje de HVDC es elegido para obtener la mejor solución técnico-económica del enlace completo y no es necesario coordinarlo con el nivel de voltaje del lado de corriente alterna. Enlaces HVDC con potencia nominal de 1200 MW a 3000 MW operan con  $\pm 500$  kVdc. Al contrario de la CA, donde se encuentran dificultades cuando la distancia a transmitir es considerable, con HVDC los límites técnicos entregados por la distancia son casi nulos.[3] La posibilidad de controlar exactamente el nivel de la potencia transmitida es una de las ventajas del HVDC.

Este control es realizado electrónicamente por los sistemas de control en las estaciones convertidoras. Usualmente el modo de control principal es el de transferencia de potencia constant.[1-4] El hecho de que la potencia transmitida por el enlace de HVDC sea continuamente controlada imposibilita la sobrecarga del enlace y la consecuente pérdida de éste cuando más es necesitado. También significa que, en comparación con enlaces de corriente alterna, se puede limitar los flujos de potencia en paralelo en un sistema interconectado. [2]

## V. COMPONENTES DEL SISTEMA HVDC (PDF 2)

Según sus características permiten adaptar los sistemas HVDC para resolver diferentes problemas, como mejoras en el control, en la capacidad de transmisión, reducción de armónicos entre otras. [5]

### V-A. Válvulas.

Para trabajar en altas tensiones y corrientes las válvulas están formadas por varios dispositivos conectados en serie o en paralelo, protegidos con circuitos que reducen los esfuerzos producidos por los cambios de corriente  $di/dt$  y tensión  $dv/dt$  que ocurren en los procesos de conmutación. [1]

### V-B. Filtros.

**V-B1. Filtros en el lado AC.:** Eliminan los armónicos generados por la unidad convertidora y proporcionan una parte de la potencia reactiva necesaria para el funcionamiento de la misma.

**V-B2. Filtros en el lado DC. :** Reducen la componente AC de la señal continua que se desea obtener (reducción del rizado), pueden ser de tipo pasivo o activo. Los armónicos generados en los convertidores de los HVDC no interfieren en el funcionamiento del convertidor, pero se pueden transmitir por las líneas de AC y DC produciendo: Corrientes de armónicos, sobretensiones en puntos de las redes, interferencias en los elementos de protección y equipos de comunicación adyacentes.

**V-B3. Filtro Shunt.:** Son capacitivos a la frecuencia fundamental y producen potencia reactiva en adelanto, no aumentan apreciablemente la regulación del sistema AC y la reactancia de conmutación del convertidor es tan baja como sea factible, ya que el filtro es aproximadamente un cortocircuito de las corrientes armónicas. El filtro shunt normal, sintonizado a una sola frecuencia (pasabanda), presenta una baja impedancia (resistiva) a la frecuencia resonante.

**V-B4. Filtro de sintonía doble o triple.:** Tienen dos o tres frecuencias resonantes, comportándose de forma similar a dos o tres filtros simples en paralelo. Los filtros pasabajos presentan una baja impedancia resistiva sólo a frecuencias elevadas.

### V-C. Líneas de Transmisión.

El 88 % de la capacidad instalada en HVDC corresponde a líneas aéreas y el 12 % a cables subterráneos y submarinos. Las líneas aéreas de un sistema HVDC presentan ventajas respecto a las líneas en HVAC. Una de ellas es el tamaño de las torres que son mas pequeñas porque el número de cables es menor que en los sistemas AC, lo cual hace que el terreno de servidumbre sea menor. El diseño mecánico y eléctrico de las torres es similar al de las torres de AC, con las diferencias de la configuración de los conductores, los requerimientos de campo eléctrico y el diseño de aisladores. Para líneas subterráneas y submarinas existen diferentes tecnologías de cables DC, algunas de ellas comunes a los existentes en AC. [Frau,2005]. Algunos tipos de cables usados son:

- Cable de Papel Impregnado (MI Mass Impregnated).
- Cable de aceite (OF Oil Filled).
- Cable XLPE (Cross-Linked polyethylene).
- Cable PPLP (Polypropylene Laminated Paper).
- Extruido para VSC.

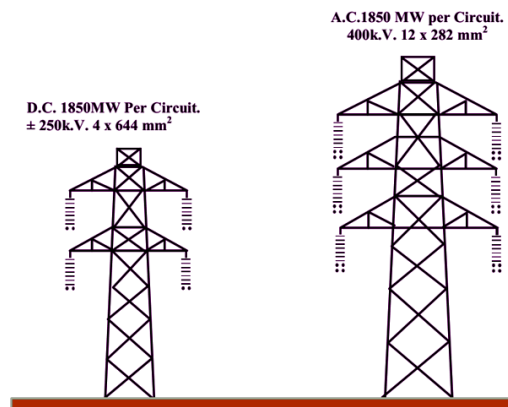


Figura 1. Compacción HVDC and HVAC

### V-D. Transformadores de conversión.

- Un desfase de  $30^\circ$  entre las tensiones que se suministran a los polos cuando la configuración es de 12 pulsos, para la reducción de armónicos, especialmente 5th y 7th armónicos
- Aisla los sistemas AC y DC para evitar que una tensión DC entre al sistema AC.
- Reduce las corrientes de cortocircuito y el rizado de las corrientes de conmutación.
- Entrega un nivel de tensión adecuado al convertidor.[Carlson, 1996].

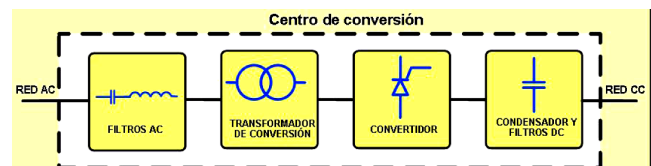


Figura 2. Esquema simplificado de una estación de conversión.

## VI. CONFIGURACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN HVDC (PDF 4)

### VI-A. Conexión Punto a punto.

La conexión se realiza directamente entre dos subestaciones (punto a punto) cuando por razones técnicas, económicas o ambientales la conexión mediante HVDC es mejor que la HVAC. En este caso cada una de las subestaciones del sistema funcionara como un convertidor, ya sea como rectificador o inversor en función de la dirección del flujo de potencia. Es la conexión más utilizada hasta el momento de HVDC.

### VI-B. Conexión Multiterminal.

Consiste en la conexión de tres o más convertidores separados geográficamente. Existen dos tipos de conexiones multiterminales, una conocida como paralelo, que consiste en la interconexión de los convertidores en paralelo, así cada uno vería la misma tensión y otra de serie donde se conectarían los convertidores en serie.[6]

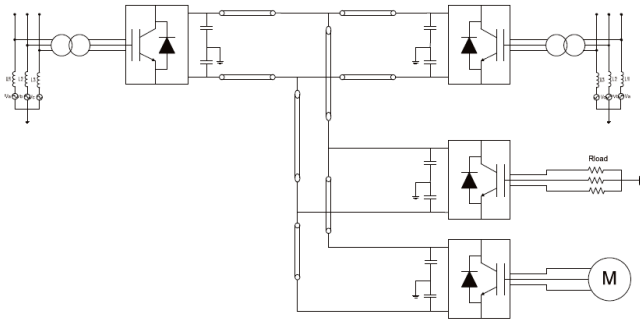


Figura 3. Conexión Multiterminal

#### VI-C. Conexión Back-to-back.

Conecta dos sistemas asíncronos (a distinta frecuencia). La instalación consiste en la interconexión de dos convertidores situados en la misma estación convertidora, uno para cada sistema eléctrico. La interconexión se realiza mediante un enlace en corriente continua, sin la necesidad de una línea de transmisión.

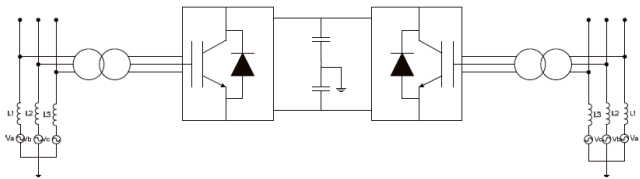


Figura 4. Conexión Back-to-back.

#### VI-D. Conexión Unitaria.

La transmisión en DC se implementa directamente en el punto de generación de energía. Es utilizada principalmente en centrales hidroeléctricas o eólicas, en donde es posible alcanzar la máxima eficiencia de las turbinas debido a que, sin importar la velocidad de la turbina, el inversor se encarga de entregar a la red la señal de tensión a la frecuencia fundamental, ya sea 50 o 60 Hz.

### VII. CONEXIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS EN HVDC (PDF 4)

#### VII-A. Monopolar con retorno por tierra

Utiliza un único conductor para transmitir energía eléctrica, realizando su retorno por tierra o por mar mediante electrodos conectados a las unidades convertoras. Los arreglos monopolares varían de unidades convertoras de 6-pulsos hasta unidades de 12-pulsos, conectadas en serie o paralelo en los terminales del sistema de transmisión HVDC.

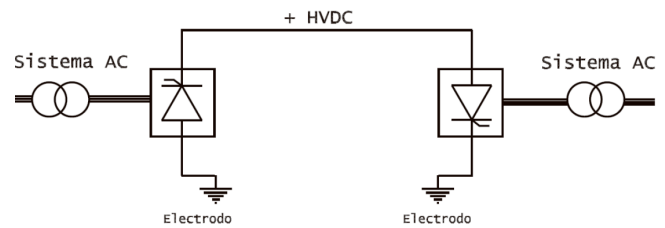


Figura 5. Monopolar con retorno por tierra

#### VII-B. Monopolar con retorno metálico o Back to Back.

Utiliza dos conductores, uno en alta tensión para la transmisión de energía eléctrica y el otro conductor por el cual se realiza el retorno con tensión reducida. El neutro del sistema monopolar en la subestación se conecta a la red de tierra de la estación o a un electrodo. Esta configuración generalmente se emplea:

- Durante la primera etapa de construcción de un sistema bipolar y si el flujo de corriente por tierra no es deseable.
- Si la transmisión se realiza a cortas distancias.
- Si la resistividad de la tierra es lo suficientemente alta, como para construir una puesta a tierra eficiente y económicamente viable.

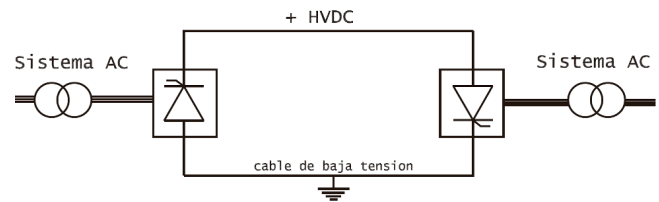


Figura 6. Monopolar con retorno metálico.

#### VII-C. Bipolar con retorno por tierra.

Es la combinación de dos polos monopolares, empleado cuando se supera la capacidad de transmisión de un enlace monopolar. El flujo de potencia se realiza en una sola dirección. En esta configuración, un polo tendrá polaridad positiva con respecto a tierra y el otro tendrá polaridad negativa con respecto a tierra. Esta configuración proporciona un alto grado de flexibilidad en su operación, ya que puede trabajar a una capacidad reducida de potencia en caso de fallas o mantenimiento de uno de sus polos, debido a que la corriente del polo en avería o mantenimiento será conducida a través del retorno de tierra, y en caso de falla, la corriente será aislada. En el caso de que se pierda una línea de transmisión de algún polo, las unidades convertoras pueden ser conectadas en paralelo, utilizando maniobras adecuadas para cambiar la polaridad de uno de los polos de la estación, permitiendo a ambos polos operar en la configuración monopolar con retorno por tierra.

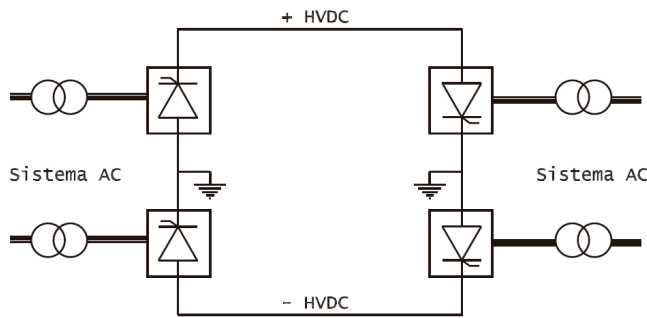


Figura 7. Bipolar con retorno por tierra.

#### VII-D. Bipolar con neutro metálico.

Utilizado cuando las corrientes de tierra son muy altas y la distancia entre los terminales del sistema HVDC es corta, o cuando no es posible colocar un electrodo por alguna razón, por ejemplo, alta resistividad de la tierra. También se utiliza como camino de retorno cuando la línea de transmisión de un polo está fuera de servicio. Este conductor neutro solo requiere aislamiento para baja tensión, pero puede ser completamente aislado, sirviendo como conductor de respaldo si alguno de los conductores de los polos no estuviese disponible.

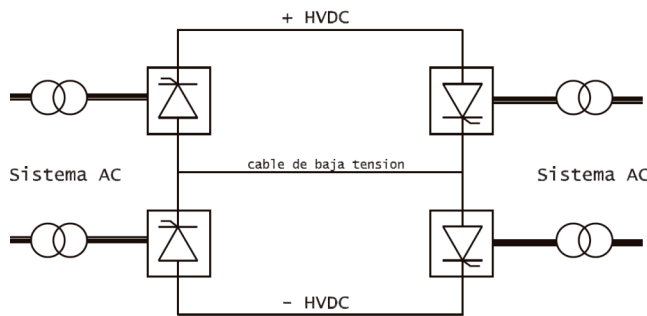


Figura 8. Bipolar con retorno metálico.

#### VII-E. Homopolar.

Este tipo de enlace consiste en la operación de dos cables conductores con la misma polaridad utilizando la tierra o un conductor metálico como retorno. En este conductor habrá dos veces la corriente nominal de una línea.

### VIII. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS HVDC (PDF 5)

#### VIII-A. Ventajas.

- Permite el uso efectivo de fuentes de energía, remotas de centros de la carga, y conectar redes no sincronizadas.
- Posibilidad del control total de potencia activa y control rápido del flujo eléctrico.
- Corredor de paso menor en líneas en corriente continua comparado con la misma potencia en corriente alterna.
- Menor magnitud del efecto corona y no se sobrecargan.
- Eliminación de las pérdidas por capacidad entre conductores.

- Mejoran la estabilidad de la red y reducen de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Menor propensión a los cortes de electricidad.
- Costes de inversión mas bajos debido a un numero menor de conductores y estructuras mas simples.

#### VIII-B. Desventajas

- Alto coste de los equipos de conversión y requerimiento de controles complejos.
- Imposibilidad del uso de transformadores para variar la tensión.
- Generación de armónicos en el lado de corriente alterna.
- Obligación de tener un generador de reactiva.

### IX. CONSIDERACIONES TÉCNICAS (PDF 3)

#### IX-A. Conexión asíncrona.

Un enlace de continua es una conexión asíncrona entre dos sistemas de corriente alterna, esto permite interconectar dos sistemas de frecuencias distintas y no transfiere las perturbaciones de uno a otro sistema.

#### IX-B. Control del flujo de potencia.

Un enlace HVDC es capaz de mantener el flujo de potencia especificado con independencia de las oscilaciones electromecánicas presentes en la red.

#### IX-C. Compensación de líneas.

En líneas aéreas de **corriente alterna** de gran longitud es necesario recurrir a la compensación para aumentar la capacidad de transferencia de potencia.

#### IX-D. Corrientes de cortocircuito.

Dado que el enlace al no transferir potencia reactiva no contribuye al aumento de la potencia de cortocircuito en el nudo de conexión.

### X. CONSIDERACIONES ECONOMICAS (PDF 3)

Desde el punto de vista económico, se debe realizar un estudio detallado que permita la elección de la tecnología adecuada. El coste de una línea de transporte de energía eléctrica supone la suma del coste de inversión más el coste de operación y mantenimiento.

#### X-A. Desde el punto de vista de la inversión.

Desde una determinada distancia de transmisión las pérdidas en la línea aumentan considerablemente para HVAC. En cambio en HVDC las pérdidas de las líneas, si bien aumentan linealmente con la distancia, estas no sufren el aumento explosivo que sufren las líneas AC por el efecto de la capacitancia.

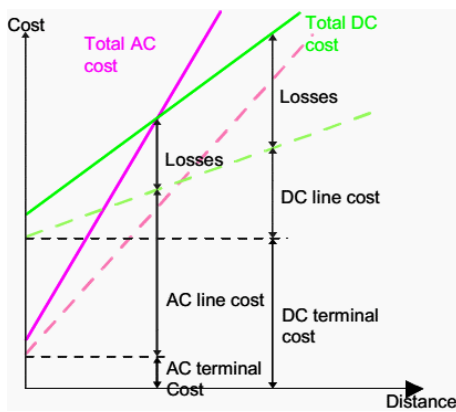


Figura 9. Costo v/s Distancia en HVAC y HVDC

### X-B. Desde el punto de vista de la operación.

Las pérdidas por resistencia crecen en ambas linealmente con la distancia, pero llega un punto en que las pérdidas por capacitancia en las líneas AC crecen mucho más rápido, entregando uno de los motivos por el cual se prefiere transmisión en DC a transmisión en AC a partir de cierta distancia.

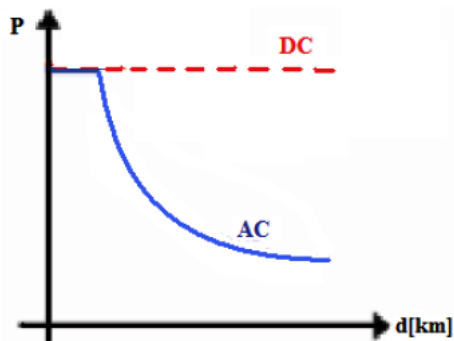


Figura 10. Potencia v/s Distancia en HVAC y HVDC

### X-C. Desde el punto de vista del mantenimiento.

Los costes de mantenimiento serán más reducidos en las líneas por tener menos elementos pero superiores en las subestaciones por las estaciones convertoras.

## XI. TECNOLOGÍAS HVDC (PDF 1)

### XI-A. Tecnología Clásica o LCC (Line Commutated Converter).

Emplea convertidores alimentados por corriente con interruptores equivalentes (tiristores) conmutados por línea. La característica más importante de las estaciones convertidoras de conmutación natural es que necesitan de una red con generación para poder operar.

Las estaciones convertidoras conmutadas por capacitores, CCC, son especialmente atractivas cuando las redes de alterna, donde se va a conectar la estación convertidora, son débiles, es decir con relación de cortocircuito menor a 2. El hecho de tener un condensador en serie entre el transformador y las

válvulas de tiristores hace que el rectificador o inversor tolere fluctuaciones de voltaje en el lado de alterna.

### XI-B. Tecnología con Convertidores Alimentados por Tensión (VSC).

O más bien conocida como HVDC Light, ya que es ABB la empresa que más la implementado y les ha proporcionado el respaldo técnico necesario.

## XII. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS HVDC(PDF 4).

### XII-A. Líneas de transporte de potencia a largas distancias.

A distancias entre 400 y 700km, las pérdidas por corrientes parásitas y el coste de una línea de corriente alterna superan a los de una línea de corriente continua, por eso se utilizan instalaciones HVDC. Un ejemplo podrían ser las líneas de corriente continua que conectan la presa de las tres gargantas con distintas ciudades en China, las líneas están alrededor de 3000MW y longitudes alrededor de 900km.[8]

### XII-B. Transmisión de potencia en entornos marinos o subterráneos.

En AC las pérdidas de las líneas subterráneas o marinas son considerables debido a la capacitancia de los conductores. Para eliminar las pérdidas se utilizan sistemas que trabajen en DC. Por ejemplo la línea que cruza el canal de la Manga que une el Reino Unido y Francia con una longitud de 70km y una potencia de 2000MW.[8]

### XII-C. Conexión de sistemas eléctricos asíncronos.

En distintas zonas del mundo, las redes eléctricas colindantes trabajan a distinta frecuencia, para poder unirlos se utilizan estaciones convertidoras, que mediante convertidores modulan la tensión y la corriente a la frecuencia óptima. Esta configuración es conocida como **bact-to-back**. Un ejemplo podría ser la conexión entre Paraguay y Brasil con una potencia de 55MW. [8]

### XII-D. Estabilización del sistema eléctrico.

En grandes sistemas eléctricos, el flujo puede verse inestable bajo ciertas condiciones transitorias, para facilitar el control de estas situaciones se instalan enlaces en corriente continua que permiten un rápido control de la potencia.[8]

## XIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### REFERENCIAS

- [1] I. Bautista and A. González, "Modelo y Simulación de un Sistema de Transmisión en Corriente Directa," Master's thesis, Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, 2008.
- [2] L. A. Navarrete, "Modelo de Sistemas de Corriente Continua en una Simulación Estacionaria de un SEP," Master's thesis, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago de Chile, 2008.
- [3] M. Monterubio, "Transporte de Energía Eléctrica en Corriente Continua. Enlaces HVDC-VSC," 2008.
- [4] J. J. Rudervall Roberto, "Interconexión de Sistemas con HVDC," *Seminario Internacional de Interconexiones CIGRÉ*, Noviembre 2003.

- [5] SIEMENS, "Proven Technolgy for Power Exchange - High Voltage Direct Current Transmission," *Power Transmission and Distribution*. [Online]. Available: [https://www.energy.siemens.com/cms/us/US\\_Products/Portfolio/Pages/Portfolio.aspx](https://www.energy.siemens.com/cms/us/US_Products/Portfolio/Pages/Portfolio.aspx).
- [6] A. Egea and O. Gomis, "Introduccion a los Sitemas de Alta Tension en Corriente Continua(HVDC)," 2008.
- [7] R. Múnica and D. Alejandro, "Revisión técnica, modelación y simulación de Sistemas VSC-HVDC," 2006.
- [8] *Transporte de Energía Eléctrica en Corriente Continua: HVDC*, Abril 2005.
- [9] J. I. Frau and J. Gutiérrez, "Transporte de energía eléctrica en corriente conti- nua:HVDC. ," *Distribución. Electrónica de potencia*, Endesa 2005.
- [10] A. Carlson, "Specific requirements on HVDC converter transformers. ," *ABB Transformers AB*, 1996.