

# Transmisión de Energía en Corriente Continua de Alta Tensión (HVDC)

Flórez Rico Danilo Joan, Carlos Alberto Rey Soto  
[dflorez69@unab.edu.co](mailto:dflorez69@unab.edu.co), [crey530@unab.edu.co](mailto:crey530@unab.edu.co)  
Semillero en Prospectiva Energética de Colombia

*Resumen*— Históricamente, desde los inicios de la transmisión de energía eléctrica se ha implementado la transmisión en corriente continua (CC), pero la facilidad de transformación y transporte de la corriente alterna (CA) fomentó su uso e instalación a gran escala, restringiendo el uso de la corriente continua a entornos minoritarios. Sin embargo, la investigación en este campo no ha sido abandonada, buscando nuevas y más eficientes formas de transmisión, aprovechando el vertiginoso desarrollo que ha tenido la electrónica de potencia, en la fabricación de rectificadores e inversores, que facilitan considerablemente la implementación del sistema HVDC. El objetivo de este documento es presentar los principales conceptos relacionados con la transmisión de corriente continua en alta tensión (HVDC), el funcionamiento de sus distintos componentes, sus ventajas y desventajas con respecto a la transmisión en corriente alterna en alta tensión (HVAC), desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

*Índice de Términos*—Transmisión en corriente continua en alta tensión HVDC, transmisión de alto voltaje en corriente alterna HVAC, electrónica de potencia, rectificadores, inversores, económico, ambiental.

## I. INTRODUCCIÓN

El consumo global de energía crece continuamente pero, además, la energía se obtiene con mayor frecuencia de recursos situados muy lejos del punto de consumo. Cada día es más importante el transporte de energía a largas distancias. El petróleo se transporta frecuentemente en superpetroleros y el gas por gasoductos. El carbón empleado para producir electricidad usa el transporte ferroviario, una solución que puede exigir un costoso reforzamiento de los sistemas de vías. Puede resultar más económico generar la electricidad cerca de los yacimientos de carbón y transmitirla a los consumidores.

Dado que la producción de energías renovables como la hidroeléctrica, la eólica y la solar está condicionada por la localización, a menudo no hay alternativa a la transmisión a largas distancias.

Por consiguiente, la transmisión de energía eléctrica está llamada a desempeñar una función más y más importante. En este artículo, se estudian los últimos avances en el campo de la transmisión masiva de energía eléctrica.

La transmisión masiva de la energía eléctrica se efectúa principalmente en corriente alterna (CA), pero desde los inicios de la transmisión de energía eléctrica se ha implementado la transmisión en corriente continua (DC). No obstante, ésta presenta considerables desventajas, como la dificultad de utilizar transformadores para variar niveles de tensión, las dificultades para rectificar voltajes generados por fuentes de corriente alterna.

La transmisión de corriente continua de alto voltaje HVDC (“High Voltage Direct Current”) requiere de ciertos componentes, entre ellos, sistemas de rectificadores e inversores, que permitan conectar estas redes con redes de corriente alterna, incluso, para la interconexión de sistemas de CA de distintas frecuencias o que sus voltajes estén desfasados (asíncronos). Las aplicaciones más habituales de los sistemas HVDC se consiguen en lugares donde la transmisión HVAC (“High Voltage Altern Current”) no es técnica o económicamente viable. Algunas de estas aplicaciones, son:

- Líneas de transporte de potencia en largas distancias.
- Transmisión de potencia en entornos marinos o subterráneos.

- Interconexión de sistemas eléctricos de CA asíncronos.
- Estabilización de líneas en CA

## II. CONCEPTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS HVDC

### A. Tipos de líneas de Transmisión en HVDC

La Transmisión de la energía eléctrica está cubriendo cada vez mayores distancias debido a que la generación con fuentes renovables como la producida en centrales hidroeléctricas, parques eólicos y campos fotovoltaicos está limitada por la localización geográfica y no deja otra alternativa. Esta situación ha promovido el desarrollo de las líneas de transmisión en HVDC, permitiendo el desarrollo de líneas de transmisión que puedan ser instaladas en ambientes especiales

La transmisión se puede hacer de muchas formas ya sea subterránea, submarina o aérea; en todos estos casos se busca el mínimo daño a la naturaleza y lograr llegar a lugares mucho más remotos.

La *transmisión submarina* se efectúa generalmente en CC debido a que en CA está limitada a menos de 130 kilómetros, por efectos de la reactancia equivalente de la línea, lo cual hace que su transmisión en CA se técnicamente inviable. Los sistemas HVDC con cables submarinos permiten la interconexión de sistemas en distancias mayores a 600 km, con potencias que pueden llegar a los 1.000 MW, en profundidades no mayores a 100m.

La *Transmisión subterránea* se utiliza en zonas aglomeradas donde es imposible la instalación de generación de energía en sitios cercanos y esta debería ser suplida por generadores distantes. Este tipo de líneas permiten la transmisión de energía eléctrica de una manera más fácil y práctica, en aquellas regiones en donde el espacio aéreo es limitado. Normalmente estas líneas subterráneas son instaladas a orillas de las rutas de acceso.

La Transmisión aérea en HVDC presenta muchas ventajas importantes respecto de las líneas aéreas HVAC. Una de las ventajas es el tamaño de las

torres, debido a que el efecto inductivo no está presente en las líneas de DC. Si bien la distancia entre líneas debido a la tensión es mayor en HVDC, el número de conductores es menor.



Fig. 1 ejemplo torres en HVAC



Fig.2 ejemplo torres HVDC

En las figuras 1 y 2 se observa la diferencia entre tamaños y número de conductores para transmitir la misma cantidad de potencia. La Fig.1 muestra el ejemplo de la transmisión de una cantidad de carga en AC, la cual requiere de 9 conductores y tres torres. Como se observa en la figura 2, un sistema de HVDC solo utiliza 2 conductores y una sola torre, para transmitir la misma potencia. Además que el impacto ambiental sería mucho menor que el de una línea HVAC.

### B. Tipos de Conexiones en HVDC

En este párrafo se analizarán los diferentes tipos de configuración de una sistema de transmisión HVDC, entre los cuales se encuentran los siguientes esquemas: monopolar, bipolar y homopolar.

**Monopolar:** Este esquema de conexión se muestra en la figura 3 y consiste en la utilización de un único conductor para transmitir potencia entre una estación de conversión y la estación de inversión, haciendo el retorno por medio de los electrodos de las subestaciones conectados a tierra. Este tipo de conexión permite el ahorro de un cable conductor, aunque se debe tener en cuenta que no siempre es aconsejable su uso, principalmente cuando las pérdidas por efecto de resistencia de puesta a tierra son muy significativas o no se pueden instalar por razones medioambientales.

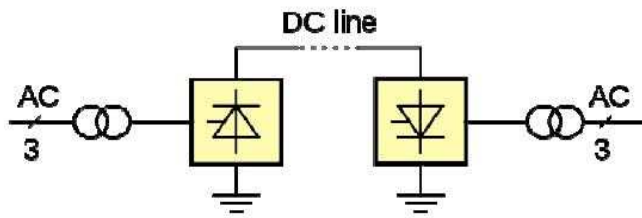


Fig.3 Conexión Monopolar

**Bipolar:** Este esquema se muestra en la figura 4 y se caracteriza por el uso de 2 conductores, uno que actúa con polaridad positiva y otro con polaridad negativa, transfiriendo la misma potencia paralelamente. Esta conexión permite que en circunstancias normales de operación la corriente de retorno sea cero, porque al aplicar la primera ley de Kirchhoff las corrientes, procedentes de la línea con polaridad positiva y de la línea con polaridad negativa se cancelan. En situación en que la línea presente una falla o se deba hacer mantenimiento programado, la otra línea puede operar como una línea monopolar.

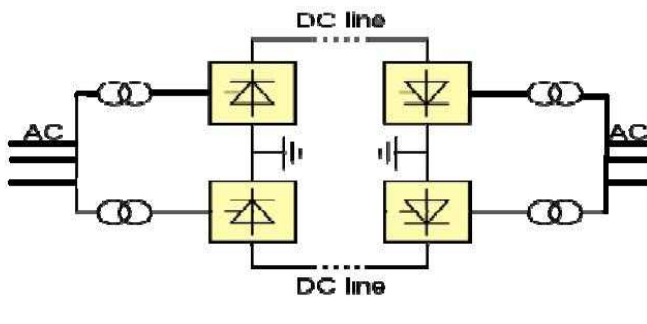


Fig.4 Conexión Bipolar

**Homopolar:** El esquema se muestra en la figura 5 el cual consiste en la operación de dos cables conductores con la misma polaridad utilizando la tierra o un conductor metálico como retorno. En este conductor circulará dos veces la corriente nominal de una línea.

### III. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN HVDC

Estas configuraciones se establecen por el uso y aplicaciones que hasta hoy han tenido las redes en corriente continua. Sus configuraciones son:

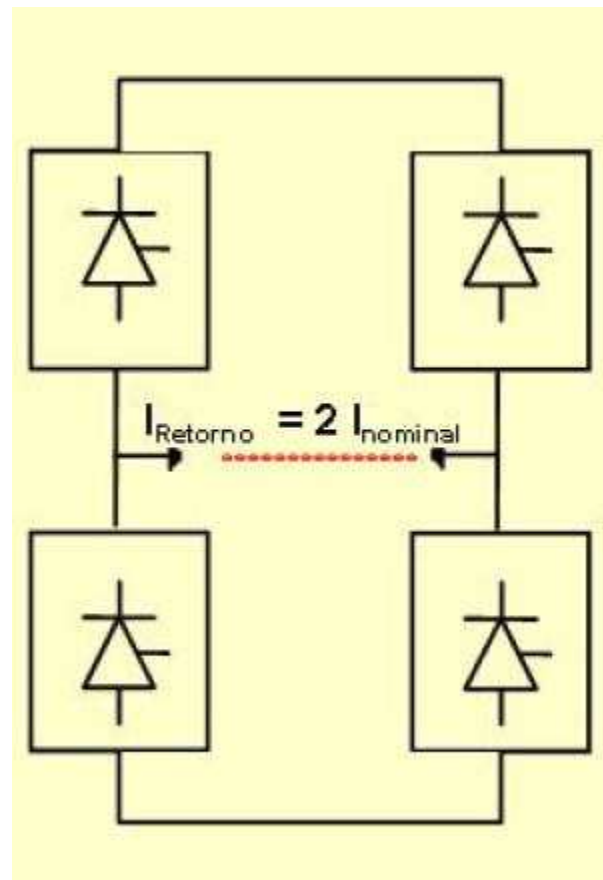


Fig. 5 Conexión Homopolar

#### A. Punto a punto.

La configuración punto a punto, se muestra en la figura 6 y es la tipología más utilizada para interconectar dos puntos a grandes distancias por medio de una línea DC.

Este tipo de configuración consiste en dos estaciones convertidoras conectadas por medio de una línea de transmisión, usualmente líneas submarinas. Permite la transmisión a cargas aisladas.

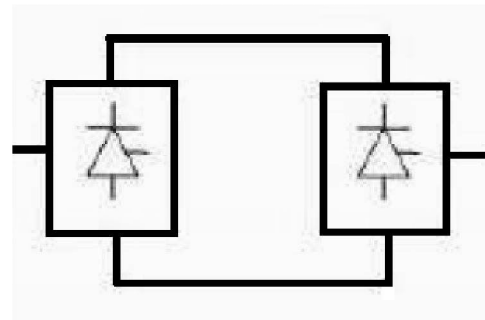


Fig.6 Configuración Punto a Punto

**B. Back-to-Back**

Esta configuración es usada para conectar dos sistemas asíncronos (a diferente frecuencia) o también acoplamiento dos redes de la misma frecuencia nominal, lo cual se consigue ajustando frecuencia de la red conectada al inversor y al rectificador. Esta configuración consiste en la interconexión del rectificador y el inversor que se encuentran en la misma estación convertidora, la interconexión se efectúa por medio de una conexión en DC, sin la necesidad de una línea de transmisión.

**C. Multiterminal:**

Cuando es necesaria la conexión de tres o más subestaciones separadas geográficamente se utiliza la configuración multiterminal. Este tipo de configuración muestra las bases para crear el concepto de bus de transmisión en corriente continua. Existen dos tipos de conexiones multiterminales, una conocida como paralelo, que consiste en la interconexión de los convertidores en paralelo y otra se conectarán los convertidores en serie. También pueden existir conexiones híbridas combinando serie y paralelo.

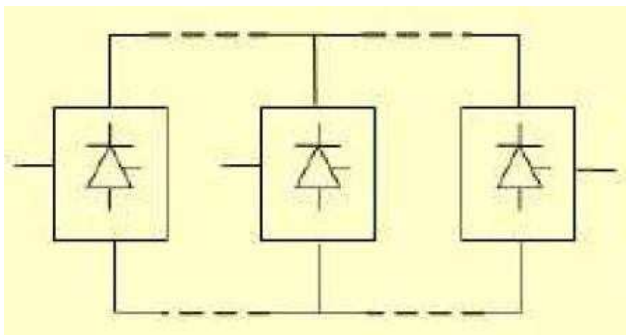


Fig.7 Multiterminal en paralelo

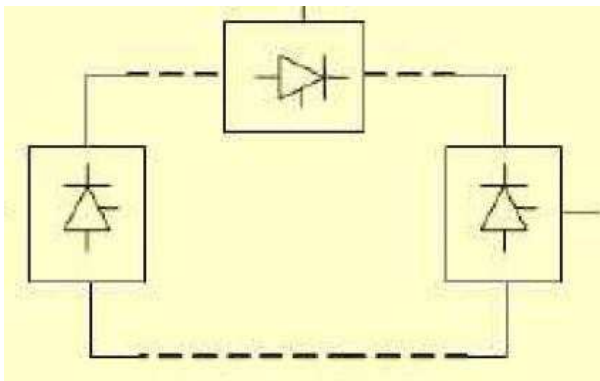


Fig.8 Multiterminal en serie

**IV. COSTOS DE LÍNEA**

Uno de los casos que más se ha estudiado es el costo de las instalaciones de HVDC. Debido al alto costo inicial de las instalaciones, solo es viable proyectos donde la distancia sea larga o las pérdidas sean considerables.

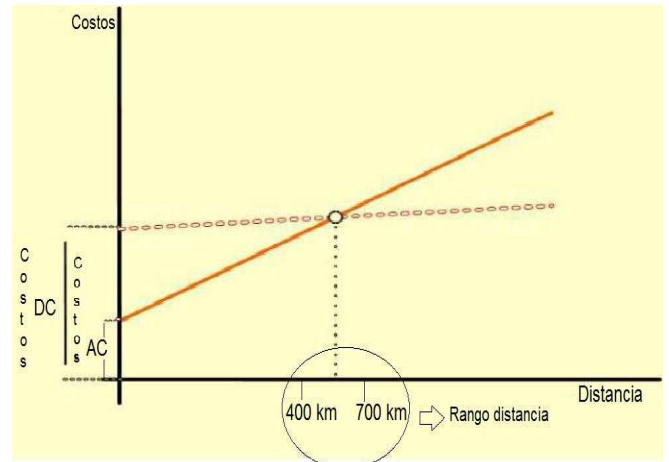


Fig.9 Comparación de los costos DC y AC

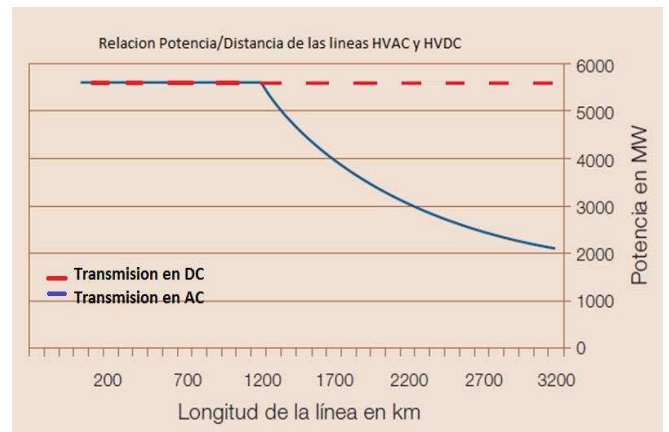


Fig.10 comparación entre DC y AC ls pérdidas por distancias de las líneas

A la hora de escoger entre un sistema HVAC o HVDC en la transmisión de la energía eléctrica, se deben tener en cuenta diversos criterios. Uno de los principales es la viabilidad técnica de realizar el enlace con cada una de las tecnologías.

En la figura (Fig.10) se muestra como la potencia del sistema HVDC se mantiene independiente de la distancia. A diferencia de las líneas de HVAC la capacidad de transmisión disminuye con la longitud de las líneas debido a sus efectos inductivos. Otra

dificultad es el desfase producido por esta misma inductancia entre los dos extremos de la línea, ya que esto puede conducir a la inestabilidad del sistema. Estos problemas no aparecen en los sistemas HVDC por no estar afectado por la inductancia de la línea [1].

Otro problema técnico consiste en la imposibilidad de conectar en corriente alterna dos sistemas que funcionan a diferente frecuencia (asíncronos). En estos casos se puede una de las soluciones podría ser la interconexión por medio HVDC sin importar la distancia que separe ambos sistemas. Esta al no ser afectada por las frecuencias de sistemas en corriente alterna, puede recibir corriente a una frecuencia y transmitirla, y entregarla en otra frecuencia. En ocasiones, la conexión de los sistemas se realiza en el interior de una subestación, haciendo innecesario la instalación de las líneas de transporte.

Otro factor es desde el punto de vista económicamente cual es menos costosa con relación a la distancia de instalación. Como se muestra en la Fig.9 se puede ver que en un rango de distancia entre 400 km y 700 km para las líneas aéreas, el costo de las líneas en corriente continua se vuelve económicamente. En gran parte esto se debe a que las líneas en DC no tienen pérdidas por reactancia como si las tendría las líneas de transmisión en corriente alterna, como se ve en la Fig.10. También colabora el hecho que la eliminación de como mínimo un conductor y la reducción del tamaño de la torre, que hace que el costo por unidad de longitud en la de las líneas sea menor en la líneas DC que en las líneas de AC.

Unos de los problemas de la transmisión en corriente continua, es que estas no pueden usar transformadores para elevar o reducir la potencia, esto es debido que los transformadores son máquinas electromagnéticas y necesitan un campo magnético que varié el cual solo lo podría proporcionar la corriente eléctrica alterna.

## V. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA

### A. Ventajas y desventajas de los sistemas HVDC

En las ventajas podemos encontrar que:

- Mínimas Perdidas en Líneas de transporte.
- Posibilidad del control total de potencia activa.
- Corredor de paso menor en líneas HVDC, comparado con la misma potencia en líneas HVAC.
- Eliminación de las pérdidas por efecto de corrientes de fuga entre conductores

Entre las desventajas más relevantes, están:

- Altos costos de los equipos de conversión.
- Imposibilidad del uso de transformadores para variar la tensión.
- Necesidad generar al final de la línea, la potencia reactiva requerida por la carga.
- Requerimiento de controles complejos.

### B. Proyectos emblemáticos de HVDC

TABLA 1

## PROYECTOS EMBLEMÁTICOS DE TRANSMISIÓN EN HVDC

Lugar	Quebec	Shanghái	Suecia
Año	1972	2007	1999
Potencia	320 MW	3000 MW	50MW
Tensión	±80 kV	± 150kV	±80 kV
Fabricante	General electric	ABB	ABB
Tipología	Back to Back	Línea 900km	Línea 106km
Lugar	Brasil-Argentina	Colombia - Panamá	Estonia
Año	2002	Estudio	2008
Potencia	2200 MW	600MW	350 MW
Tensión	±70 kV	±450kV	±150 kV
Fabricante	ABB	ICP .SA	ABB
Tipología	Back to Back	Línea 550km	Línea 106km
Lugar	Quebec	Shanghái	Suecia
Año	1972	2007	1999
Potencia	320 MW	3000 MW	50MW
Tensión	±80 kV	± 150kV	±80 kV
Fabricante	General electric	ABB	ABB
Tipología	Back to Back	Línea 900km	Línea 106km
Lugar	Brasil-Argentina	Colombia - Panamá	Estonia
Año	2002	Estudio	2008
Potencia	2200 MW	600MW	350 MW
Tensión	±70 kV	±450kV	±150 kV
Fabricante	ABB	ICP .SA	ABB
Tipología	Back to Back	Línea 550km	Línea 106km

## VI. CONCLUSIONES

1. Con este estudio del arte referente a la transmisión en HVDC, se analiza que se podrían solucionar problemas comúnmente dados en la transmisión convencional, como las perdidas por distancias, inestabilidad de la transmisión y conexiones de sistemas en diferentes frecuencias.
2. Al ver la eficiencia de esta tecnología esta se podría implementar a un estudio para llegar a zonas no interconectadas por este medio de transmisión de energía

## REFERENCIAS

[1] H. Simpson “El proceso de las transmisión de Energía en DC”

**Autores**

Breve referencias sobre la formación académica del autor y su experiencia.