



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en sistemas de transmisión para la integración de energías renovables al sistema de potencia.

**Bogotá
Abril de 2018**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Proyecto: Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050



Informe elaborado para la Unidad de Planeación
Minero Energética - UPME
Bogotá Abril de 2018

**PROYECTO IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y REQUISITOS
MÍNIMOS NECESARIOS PARA LA FORMULACIÓN, ESTRUCTURACIÓN E
IMPLEMENTACIÓN DE UN OBSERVATORIO DE ENERGÍA QUE RECOPILE
Y ANALICE INFORMACIÓN QUE CONDUZCA A OPORTUNIDADES DE
INNOVACIÓN PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS DEL PEN 2050**

REPÚBLICA DE COLOMBIA

Germán Arce Zapata – Ministro de Minas y Energía
Jorge Alberto Valencia Marín – Director Unidad de Planeación Minero
Energética UPME
Carlos García - Subdirector de Demanda, Unidad de Planeación Minero
Energética UPME

EQUIPO DE TRABAJO DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Grupo de Investigación en el sector energético colombiano GRISEC
Modelamiento Y Análisis Energía Ambiente Economía
InTIColombia.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA
Instituto de Prospectiva de la Universidad del Valle

CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS
Director de proyecto: Omar Prias, Universidad Nacional de Colombia Sede
Bogotá.

**EQUIPO DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DE EJERCICIOS DE
VIGILANCIA TECNOLÓGICA**

Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano GRISEC,
Unversidad Nacional de Colombia

Director: Omar Prias
Asesora Metdológica: Jenny Marcela Sánchez Torres
Coordinación: David Bernardo Rojas Rodríguez
Vigías Tecnológicos: Jair Armando Castañeda Rodríguez, Laura Milena
Cruz Moreno, Luis Rafael de la Rosa Ramos Ramos, Sergio Andrés
Rodríguez Blanco, Oscar Darío Zambrano.
Apoyo: Laura Marcela Quiroga Calderón

Contenido

1. Resumen ejecutivo

1.1 Conclusiones.

2. Introducción

3. Integración de energías renovables a los sistemas de transmisión

4. Tendencias en las tecnologías de líneas de transmisión para energías renovables.

4.1 Sistemas de transmisión HVDC (High Voltage Direct Current).

4.1.1 Conexiones de los sistemas de transmisión HVDC.

4.1.2 Conexión Back to Back

4.1.3 Conexión Point to Point.

4.1.4 Conexión de cable submarino.

4.2 Configuraciones de sistemas HVDC.

4.2.1 Configuración HVDC basada en LCC (Line- Commutated Converter)

4.2.2 Configuración HVDC basada en VSC (Voltage Sourced Converter)

4.2.3 Sistemas HVDC multi - terminales (MTDC).

4.2.4 HVDC Light.

4.2.5 HVDC Híbridos.

4.3 Sistemas de transmisión de energía AC de baja frecuencia (LFAC).

5. Tendencias mundiales en tecnologías para la integración de las fuentes renovables al sistema de potencia.

6. Análisis de tendencias en publicaciones científicas

7. Referencias Bibliográficas



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en sistemas de transmisión para la integración de energías renovables al sistema de potencia

1. Resumen Ejecutivo



Bogotá
Abril de 2018

1. Resumen Ejecutivo

La adopción de tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica en el mundo es una tendencia que va tomando popularidad con el pasar de los años. Un aspecto fundamental de esta adopción es la integración de las fuentes de generación con los sistemas de potencia ya existentes. Lo anterior debido a que la generación con fuentes alternativas (Solar, eólica, mareomotriz, etc) no tiene las mismas características que la generación convencional (Termoeléctricas, plantas nucleares, etc).

Aspectos relevantes como la generación en corriente directa (DC) de los paneles solares, o la generación en corriente alterna (AC) de los parques eólicos que no tienen una frecuencia constante, sumado a las grandes distancias a las que se encuentran estos parques de los centros de consumo, llevan a pensar que los sistemas convencionales de transmisión no son los más convenientes para sistemas basados mayoritariamente en este tipo de fuentes. Frente a esta situación, en este informe se estudia cuáles son las principales tecnologías en sistemas de transmisión para la integración de las fuentes de generación con energía renovable a los sistemas de potencia.

Desde hace varios años países como China y Alemania están tomando la delantera en estos aspectos con la implementación de proyectos de aprovechamiento de renovables a gran escala. Dichos proyectos, ayudan a diversificar la matriz energética, pero al mismo tiempo generan retos que deben ser afrontados, como la necesidad de transportar grandes cantidades de energía a los centros de consumo o la interconexión al sistema de potencia ya existente. Uno de los principales retos es la optimización de la tecnología para garantizar un buen servicio y que el sistema sea confiable. Como principal candidato para la transmisión de energía se perfilan los sistemas HVDC (Corriente Directa en Alto Voltaje) en sus diferentes configuraciones.

Los sistemas HVDC ofrecen una mejor confiabilidad tanto económica como técnica para la transmisión a grandes distancias y la conexión de sistemas asíncronos. Además, ofrecen un menor costo en comparación con los sistemas AC convencionales conforme aumenta la distancia de transporte. De esta manera, disminuyen las pérdidas y eliminan el problema de la compensación de energía reactiva, que es una de las principales razones de pérdidas de los sistemas AC.

De otra parte, los sistemas HVDC ofrecen una mejor alternativa para la conexión en generación eólica, teniendo en cuenta que esta no puede mantener una frecuencia fija, dado que las corrientes de aire no son constantes. Adicionalmente, un sistema HVDC back to back permite la interconexión a diferentes frecuencias, permitiendo comercializar energía de una forma más sencilla en países que manejan diferentes frecuencias.

En los tres países con mayor producción de energía eólica (Alemania, China y Estados Unidos) existen proyectos de amplia envergadura en HVDC. En los dos primeros los proyectos más importantes se relacionan con parques eólicos. En Estados Unidos, el principal proyecto en HVDC se relaciona con energía hidroeléctrica pero actualmente se está desarrollando el proyecto Clean Line cuyo principal objetivo es aprovechar el potencial eólico del estado de Oklahoma en diferentes lugares del país.

1.1 Conclusiones.


- La tecnología que se impone en los sistemas de transmisión para la integración de las fuentes de energía renovables es la transmisión en alta tensión en corriente directa (HVDC). Dentro de las diferentes configuraciones, la tecnología HVDC multi – terminal se perfila como la tecnología más usadas no solo en sistemas con energía renovable sino en sistemas convencionales.
- Según la dinámica de publicaciones y la cantidad de proyectos de generación con energías renovables países como Alemania, China y Estados Unidos son los líderes en la integración de estas fuentes de generación al sistema de transmisión.
- En materia de costos, para cortas distancias los sistemas en AC son más convenientes, reduciendo drásticamente su precio en comparación con los sistemas HVDC.
- Para largas distancias los sistemas HVDC presentan mayor viabilidad económica, reduciendo costos por construcción de línea y reduciendo las pérdidas al no necesitar compensación de energía reactiva.
- China es el modelo a seguir en la utilización de estas tecnologías para la integración de las fuentes de energías renovables, debido a su amplia inversión, y a la gran apuesta de cambiar su matriz energética en los próximos años.
- Los sistemas con generación eólica reúnen un conjunto amplio de características que hacen atractiva la interconexión a través de sistemas HVDC, tales como su ubicación en zonas remotas y la dificultad de mantener frecuencias fijas. Los tres países con mayores niveles de generación eólica cuentan con proyectos en HVDC para el aprovechamiento de su potencial en este tipo de energía.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en sistemas de transmisión para la integración de energías renovables al sistema de potencia

2. Introducción



Bogotá
Abril de 2018

2. Introducción

El Plan Energético Nacional 2050 (PEN 2050) se presentó en el 2015 como una base para la implementación de una política energética colombiana a largo plazo. En este documento se realiza una revisión de los cambios técnicos, de negocios, aumento de la cobertura, garantía del suministro, diversificación de la canasta energética y aumento de la competitividad como elementos modeladores del futuro energético del país. De igual manera se hace un análisis de la relación economía – energía en Colombia, se estudian las perspectivas del mercado de los hidrocarburos y se plantea un escenario energético base nacional a 2050 y cuatro escenarios alternativos.

Teniendo como foco este plan, en el marco del proyecto Universidad Nacional - UPME para la “Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050”, se estructuraron un conjunto de ejercicios de vigilancia tecnológica para identificar las tendencias actuales asociadas a las variables principales que modelan los escenarios energéticos del PEN a 2050.

El presente trabajo recoge los resultados del ejercicio de vigilancia tecnológica en sistemas de transmisión para la integración de las energías renovables a los sistemas de potencia convencionales. El ejercicio se desarrolló apuntando a la oportunidad integrar energías renovables en el sistema energético nacional, como alternativa para la seguridad energética en Colombia y como opción para aumentar la cobertura del servicio en el país a través. Dichos aspectos sintetizan dos de los principales objetivos del Plan Energético y se relacionan con políticas que promueven la utilización de las energías Renovables, entre las que se encuentra la ley 1715 del 2014.

La metodología utilizada consistió en la revisión de fuentes de información estructuradas y no estructuradas, consulta a expertos y análisis de información. La metodología se profundiza en los anexos del presente informe.

Mediante las conclusiones del ejercicio, se espera contar con elementos para facilitar el monitoreo sistemático de los aspectos más relevantes en la dinámica energética del país de cara al 2050. Lo anterior representa una de las funciones principales del Observatorio de Energía que se plantea desde el proyecto para facilitar la toma de decisiones en materia de política energética.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
sistemas de transmisión para la
integración de energías renovables al
sistema de potencia

3. Integración de energías renovables a los sistemas de transmisión



Bogotá
Abril de 2018

3. Integración de energías renovables a los sistemas de transmisión.

Los sistemas de generación de energía renovables son aquellos que disponen como fuente principal de generación de un recurso ambientalmente sostenible, ya sea hidráulico, solar, eólico, biomasa, etc. En el informe se tendrá en cuenta sobre todo el recurso eólico, al ser el más utilizado para grandes plantas de generación (Congreso De Colombia, 2014).

De otro lado, se entiende por sistema de transmisión la parte del sistema de potencia que se encarga de transportar grandes cantidades de energía, desde las estaciones elevadoras en las centrales de generación, hasta las estaciones de transformación en los centros de distribución. ("Tecnología Eléctrica," 2005)

Los sistemas de transmisión se presentan en su mayoría en corriente alterna AC debido a que las principales fuentes de generación existentes en la actualidad generan este tipo de energía. En los últimos años se están desarrollando sistemas de transmisión en corriente directa DC con el objetivo de poder abarcar grandes distancias reduciendo costos y pérdidas, mejorando de esta manera la eficiencia del sistema de potencia (Ramamoorthy, 2011)

Según ("Tecnología Eléctrica," 2005), los sistemas de transmisión se dividen en varios grupos, dependiendo de la tensión a la que se transporte la energía, los principales son: Baja tensión BT (hasta 1000 v alterna y hasta 1500 v en continua), media tensión MT (de 1 kv a 36 kv), alta tensión AT (de 36 kv a 132 kv), muy alta tensión MAT (de 132 kv a 400 kv) y ultra alta tensión UAT (de 400 kv a 700 kv).



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
sistemas de transmisión para la
integración de energías renovables al
sistema de potencia

4. Tendencias en las tecnologías de líneas de transmisión para energías renovables



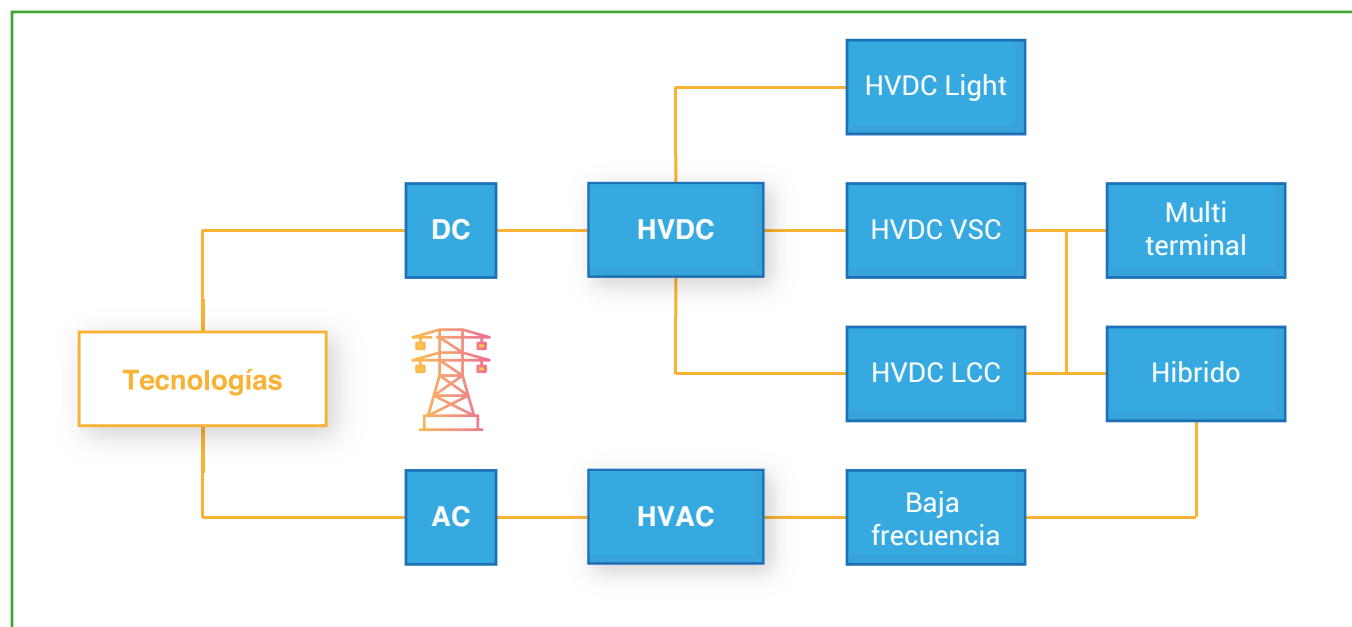
Bogotá
Abril de 2018

4. Tendencias en las tecnologías de líneas de transmisión para energías renovables.

La integración de las fuentes de generación renovables con los sistemas de transmisión presenta grandes retos en materia tecnológica, tales como el acoplamiento de frecuencias, las pérdidas de potencia en la transmisión a grandes distancias, etc (MacLeod, Barker, & Kirby, 2010). Estos retos deben ser afrontados de la mejor manera para prevenir el colapso de las redes y mantener la confiabilidad de los sistemas de transmisión.

A través del ejercicio de búsqueda se identificaron las principales tecnologías que se han desarrollado y en algunos casos implementado para la integración de las energías renovables a los sistemas de transmisión de los países que están a la vanguardia de este tema. La ilustración 1 muestra la clasificación de las tecnologías identificadas. La principal tendencia es el uso de tecnología HVDC en sus diferentes configuraciones, dentro de las cuales la tecnología HVDC multi – terminal se perfila como la tecnología más usadas no solo en sistemas con energía renovable sino en sistemas convencionales. En las siguientes secciones se describe cada una de estas tecnologías y se identifican las principales ventajas y desventajas para su aplicación.

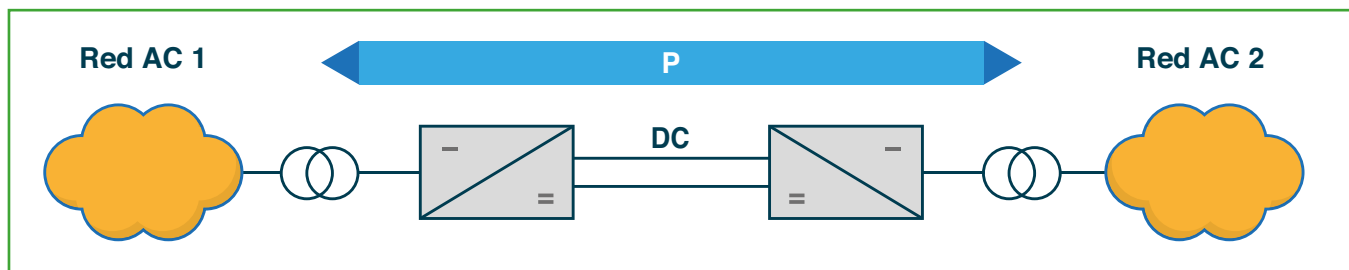
Figura 1. Clasificación de las tecnologías de transmisión



Fuente: Elaboración propia con base en la revisión de literatura.

4.1 Sistemas de transmisión HVDC (High Voltage Direct Current).

Los sistemas HVDC (High Voltage Direct Current) son utilizados principalmente para la transmisión de grandes cantidades de potencia a largas distancias. Son sistemas que permiten la conexión entre dos puntos y generalmente conectan dos redes AC, mediante la utilización de inversores que se conectan a cada uno a los transformadores de su respectiva red, con el fin de convertir la energía AC en DC y posteriormente transmitirla (Dorn, Gambach, & Retzmann, 2012). La Figura 2 muestra la configuración básica de este tipo de sistema.

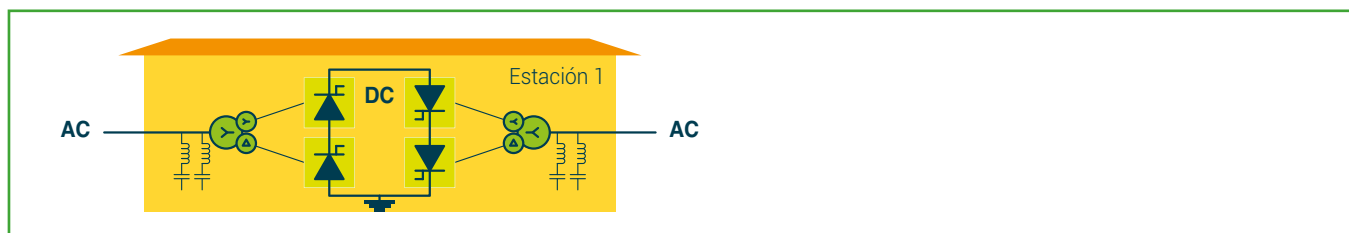
Figura 2. Configuración básica de un sistema HVDC**Fuente:** (Dorn et al., 2012)

De acuerdo con el informe presentado por Norman MacLeod, Carl Barker y Neil Kirby (2010) las formas de conexión que presentan los sistemas de transmisión HVDC son: Conexión Back to Back, Point to Point y de cable submarino, que pueden presentar diferentes características dependiendo de las necesidades que se requieran.

4.1.1 Conexiones de los sistemas de transmisión HVDC.

4.1.2 Conexión Back to Back

La conexión Back to Back consiste en ubicar y conectar las estaciones rectificadoras e inversoras una detrás de la otra, de tal manera que las partes posteriores de las mismas queden conectadas entre sí como se muestra en la Figura 3.

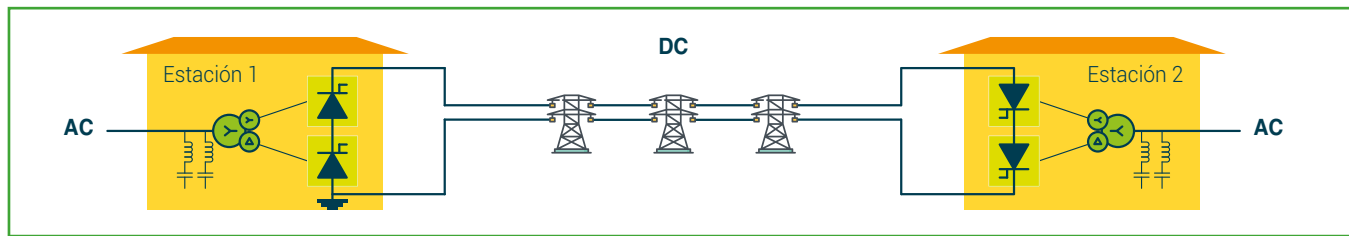
Figura 3. Conexión Back to Back**Fuente:** (MacLeod et al., 2010)

Las principales ventajas de esta conexión son las siguientes:

- En la detección de caídas repentinas de frecuencia el esquema automáticamente reprograma la potencia, para proporcionar el soporte de energía necesario para que el sistema AC no se vea afectado.
- Permite la conexión sincrónica de sistemas que operan a diferentes frecuencias.

4.1.3 Conexión Point to Point.

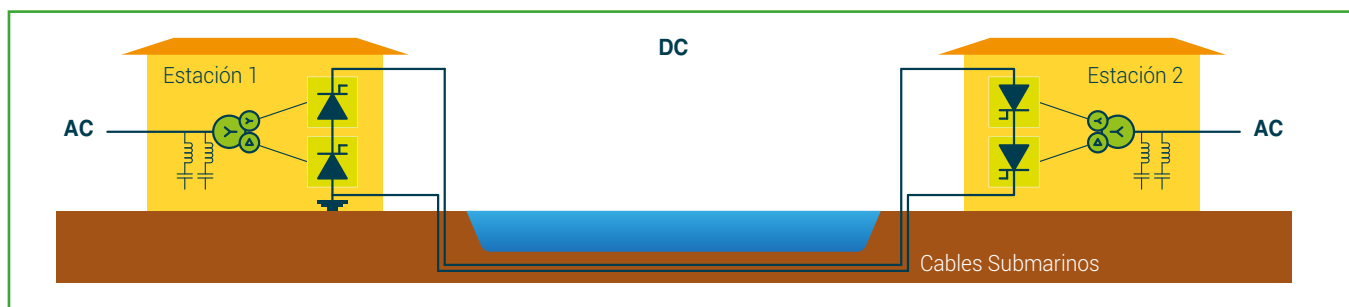
Esta forma de conexión permite conectar dos puntos a grandes distancias mediante los métodos convencionales (con torres eléctricas), teniendo en cuenta que se cuenta con dos inversores que permiten la conexión de la red DC con las redes AC. Tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Conexión Point to Point

Fuente: (MacLeod et al., 2010)

4.1.4 Conexión de cable submarino.

La principal característica de este sistema es que su funcionamiento se da para la conexión de dos redes que están separadas por cuerpos de aguas, siendo muy similar al de la conexión Point to Point, con la diferencia de que los cables van debajo de la superficie y enterrados en el fondo para prevenir accidentes con embarcaciones. Esto se puede ver más claramente en la Figura 5.

Figura 5. Conexión de cable submarina

Fuente: (MacLeod et al., 2010)

Las principales ventajas de esta conexión son:

- La conexión de redes a través de cuerpos de agua.
- No presenta los impactos negativos de la transmisión en AC como la pérdida por distancia.
- Las redes interconectadas permanecen inmunes a cualquier perturbación presente en la red contraria.

La Tabla 1 presenta las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de conexión:

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las conexiones HVDC.

Conexión	Ventajas	Desventajas
Back to Back	En la detección de caídas repentinas de frecuencia el esquema automáticamente reprograma la potencia, para proporcionar el soporte de energía necesario para que el sistema AC no se vea afectado. La conexión sincrónica de sistemas que operan a diferentes frecuencias.	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. Puede presentar los impactos negativos de la transmisión en AC como la pérdida por distancia.
Point to Point	Permite una conexión a más alto voltaje de lo usual en los sistemas HVDC. Mayor distancia entre las redes que se tienen que conectar. Mejor control de la potencia reactiva. Mejor control en la distorsión de armónicos.	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. Para cortas distancias su costo es más elevado que una conexión Back to Back.
Cables submarinos	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. No presenta los impactos negativos de la transmisión en AC como la pérdida por distancia. Las redes interconectadas permanecen inmunes a cualquier perturbación presente en la red contraria.	Para cortas distancias su costo es más elevado que una conexión Back to Back.

Fuente: Elaboración propia con base en Norman MacLeod et al., 2010.

4.2 Configuraciones de sistemas HVDC.

4.2.1 Configuración HVDC basada en LCC (Line- Commutated Converter)

Los convertidores de línea conmutada han sido la mejor opción por décadas, principalmente en la transmisión de grandes cantidades de potencia, de 1000 a 2000 megavatios (Dorn et al., 2012). Esto ocurre gracias a que las pérdidas en los convertidores son de aproximadamente 0,8%, lo cual es bueno en comparación con los sistemas VSC (Shi, Chen, & Cai, 2011).

4.2.2 Configuración HVDC basada en VSC (Voltage Sourced Converter)

El sistema HVDC VSC es un gran avance en materia de transmisión de energía, gracias al desarrollo del convertidor de fuente de voltaje que permite una mejor conexión a la red AC asíncrona, conexión de fuentes aisladas, conexión a la red de generación distribuida, control simple y evita la necesidad de recurrir a un sistema de retroalimentación de corriente secundario. (Fu, Du, Cao, & Wang, 2015).

En el desarrollo del documento se verán diferentes sistemas HVDC que usan esta tecnología y en la tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas que presentan estas tecnologías.

Tabla 2: Ventajas y desventajas de los sistemas LCC y VSC.

Conexión	Ventajas	Desventajas
Back to Back	En la detección de caídas repentinas de frecuencia el esquema automáticamente reprograma la potencia, para proporcionar el soporte de energía necesario para que el sistema AC no se vea afectado. La conexión sincrónica de sistemas que operan a diferentes frecuencias.	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. Puede presentar los impactos negativos de la transmisión en AC como la pérdida por distancia.
Point to Point	Permite una conexión a más alto voltaje de lo usual en los sistemas HVDC. Mayor distancia entre las redes que se tienen que conectar. Mejor control de la potencia reactiva. Mejor control en la distorsión de armónicos.	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. Para cortas distancias su costo es más elevado que una conexión Back to Back.
Cables submarinos	La conexión de redes a través de cuerpos de agua. No presenta los impactos negativos de la transmisión en AC como la pérdida por distancia. Las redes interconectadas permanecen inmunes a cualquier perturbación presente en la red contraria.	Para cortas distancias su costo es más elevado que una conexión Back to Back.

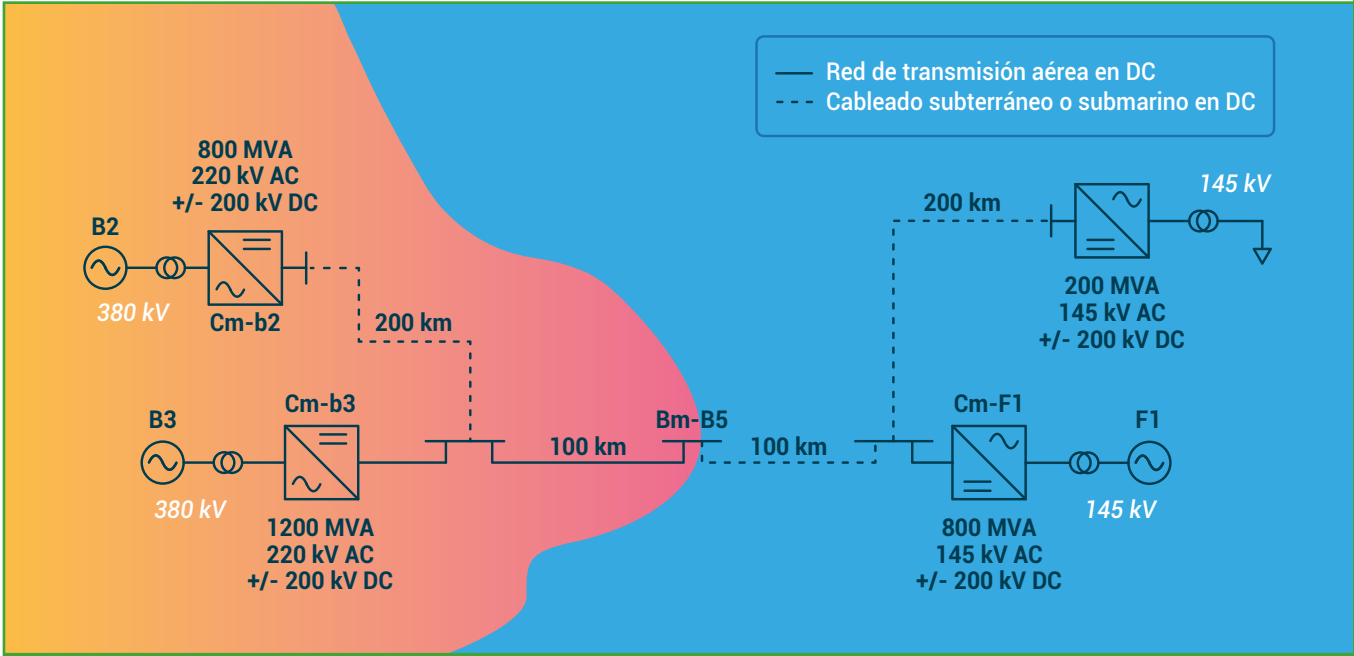
Fuente: Elaboración propia con base en (Shi et al., 2011), (Bodin, 2011) y (Fu et al., 2015).

4.2.3 Sistemas HVDC multi - terminales (MTDC).

Esta tecnología se desarrolló principalmente para responder a la necesidad de interconectar parques de generación eólica entre sí, así como con la red de transmisión eléctrica. En estos casos la tecnología de corriente de alto voltaje (HVDC) es la más utilizada para la interconexión, formando así una red MTDC multi - terminal. (Pegueroles, Barnes, Gomis, Beddard, & Bianchi, 2015).

En la siguiente imagen se presenta un ejemplo de un sistema multiterminal, que conecta la planta eólica F1 a una plataforma petrolera E1 y a dos nodos B3 y B2.

Figura 6. Sistema HVDC Multi – terminal



Fuente: (Pegueroles et al., 2015)

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que permite la integración con la red de transmisión mediante la conexión de varios puntos sin afectar drásticamente la estabilidad del sistema. En la siguiente tabla se observan y comparan las principales ventajas y desventajas de los Sistemas HVDC multi - terminales para la integración con redes de transmisión ya existentes.

Tabla 3: Ventajas y desventajas sistemas multi – terminal.

Tecnología	Ventaja	Desventaja
HVDC multi - terminal (MTDC)	Transmisión con varios puntos de conexión. Estabilidad del sistema de transmisión. Gran Capacidad de trasmisión. Alta volatilidad. Amplia distribución. Puede seguir funcionando si perdiera alguna de las estaciones convertidoras VSC (Cm). Menor perdidas en comparación con los sistemas AC. (Shi et al., 2011)	Tiene pérdidas considerables en el convertidor de 2% en comparación con los sistemas HVDC LCC de 0,8%. Un control más complejo en comparación con otros sistemas HVDC. En caso de falla, reestablecer el sistema tomaría bastante tiempo.

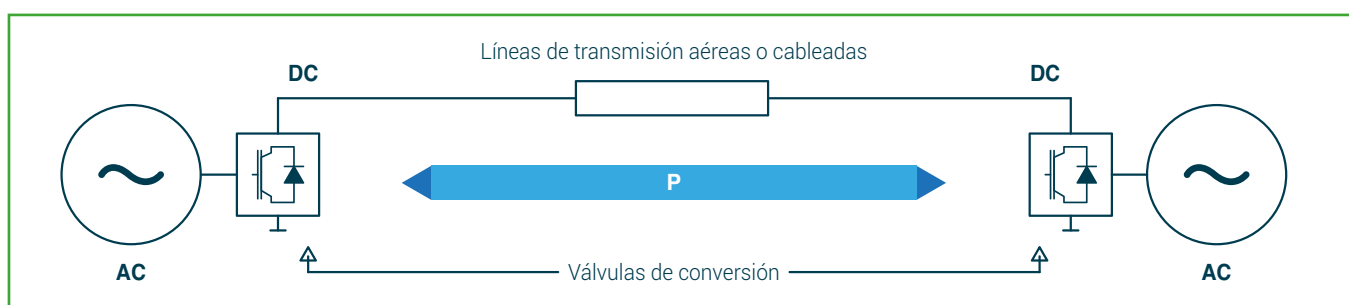
Fuente: Elaboración propia con base en (Pegueroles et al., 2015) (Shi et al., 2011) .

4.2.4 HVDC Light.

La tecnología HVDC está siendo ampliamente desarrollada, con el objetivo de integrar las fuentes de generación renovables a la red de distribución convencional, gracias a su gran popularidad entre los nuevos proyectos y a la confiabilidad que presenta ante las tecnologías de transmisión en AC.

Una de las tecnologías que más popularidad ha tenido en los últimos años son los sistemas de transmisión HVDC Light, que utilizan una tecnología de convertidor de fuente de voltaje VSC, con un autoconmutador IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), una válvula de convertidor que funciona a manera de interruptor para conmutar adecuadamente, y convertir la energía eléctrica de AC a DC o viceversa utilizando dos estaciones convertidoras con una conexión en DC que las une, tal como se muestra en la Figura 7, esto con el objetivo de controlar el flujo de energía entre ellas, debido a que una estación funciona como un inversor y la otra como un rectificador. (Bodin, 2011)

Figura 7. Sistema HVDC Light



Fuente: Fuente: (Bodin, 2011)

Este sistema de transmisión ha ganado bastante popularidad gracias a que ofrece una gran flexibilidad y una mejor capacidad de control cuando es necesaria una compensación de potencia reactiva, esto se da por el uso del transistor IGBT, que puede apagar una corriente en cualquier instante de tiempo. Esta propiedad permite que el sistema ofrezca un mejor rendimiento en el lado de la tensión AC, así como el Angulo de fase, la frecuencia y un control preciso de la potencia. (Bodin, 2011)

Un mejor control no solo permite que el sistema HVDC Light controle el flujo de potencia en la transmisión, también permite que el convertidor genere o produzca potencia reactiva por el lado AC, y esto permite la compensación de la energía reactiva en la red de transmisión que es una de las grandes desventajas que presentan los sistemas de transmisión en AC (Bodin, 2011).

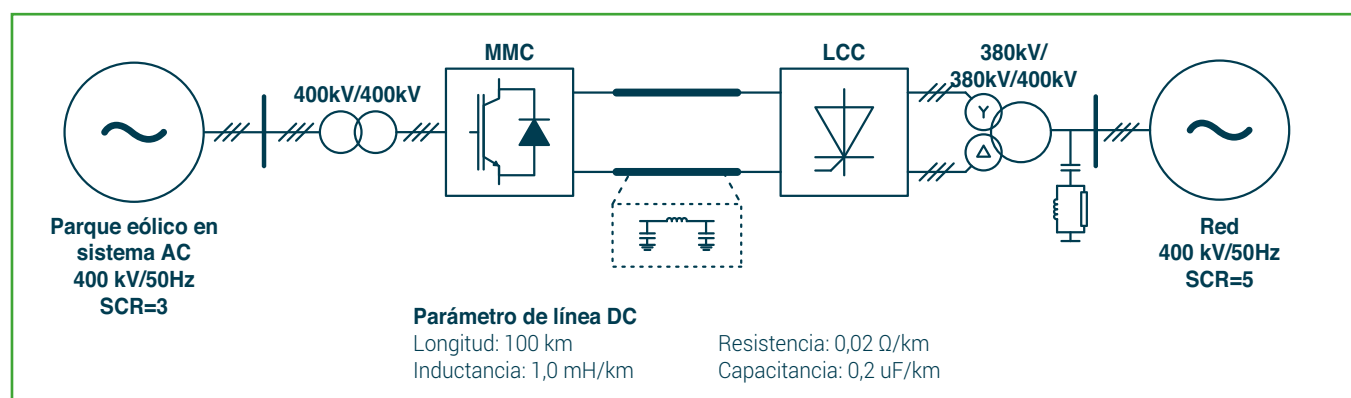
Tabla 4: Ventajas de los sistemas HVDC Light.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
HVDC Light	<p>El transistor IGBT puede apagar una corriente en cualquier momento.</p> <p>Permite la compensación de energía reactiva en el lado AC de la red de transmisión.</p> <p>Bajas pérdidas.</p> <p>Interconexión asincrónica, que permite conectar redes de transmisión AC de 50 Hz y de 60 Hz.</p> <p>Menor impacto ambiental.</p> <p>Cruce de largas distancias.</p>	

Fuente: Elaboración propia con base en (Bodin, 2011).

4.2.5 HVDC Híbridos.

Teniendo en cuenta las ventajas que presenta cada uno de los sistemas HVDC mencionados anteriormente, el sistema híbrido se perfila como una de las mejores opciones para la integración de las energías renovables, gracias a que dispone de un convertidor VSC en un terminal y un convertidor conmutado de línea LCC en la otra terminal que permite una mejor integración con sistemas multi-terminales. (Zeng, Xu, Yao, Finney, & Wang, 2015)

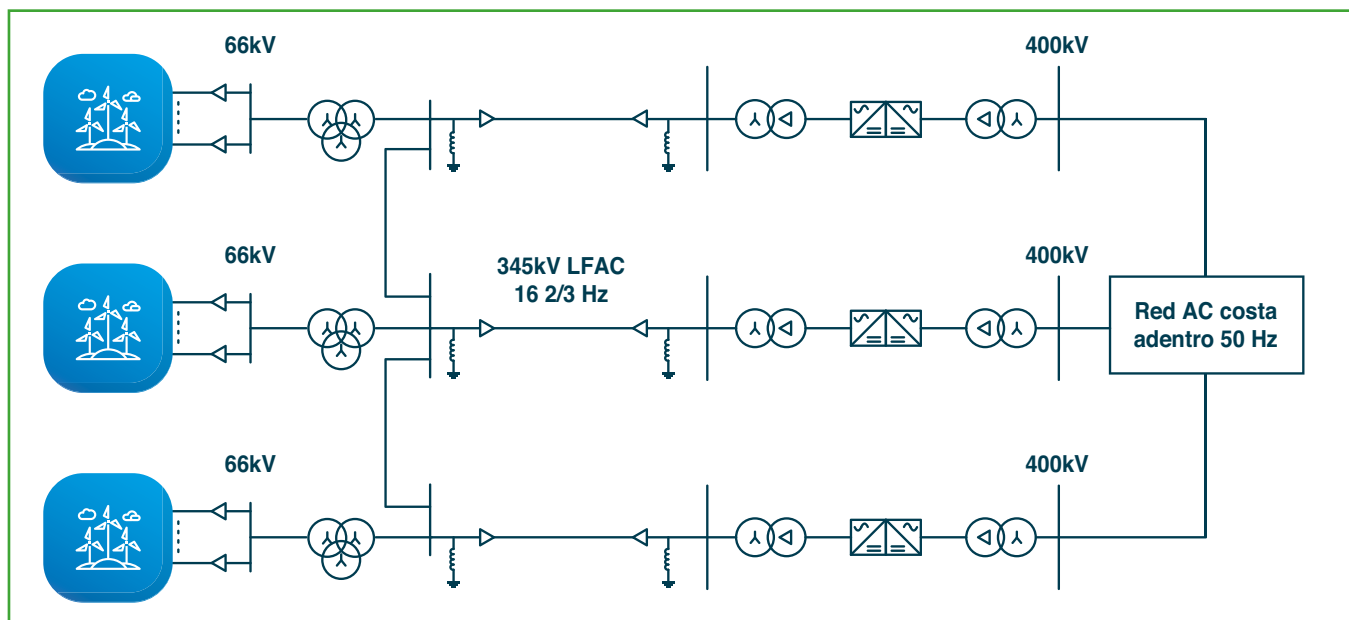
Figura 8. Sistemas HVDC Híbrido

Fuente: (Zeng et al., 2015)

4.3 Sistemas de transmisión de energía AC de baja frecuencia (LFAC).

Estos sistemas funcionan como complemento de los sistemas HVDC o HVAC, trabajan básicamente como estos sistemas combinados y utiliza cables del sistema HVAC submarinos y terrestres operados a baja frecuencia para llevar la energía producida costa afuera por los parques eólicos a una estación convertidora HVDC back to back en tierra, que hace la conexión con el sistema de potencia en tierra. (Canelhas, Karamitsos, Axelsson, & Olsen, 2015)

Figura 9. Sistemas LFAC

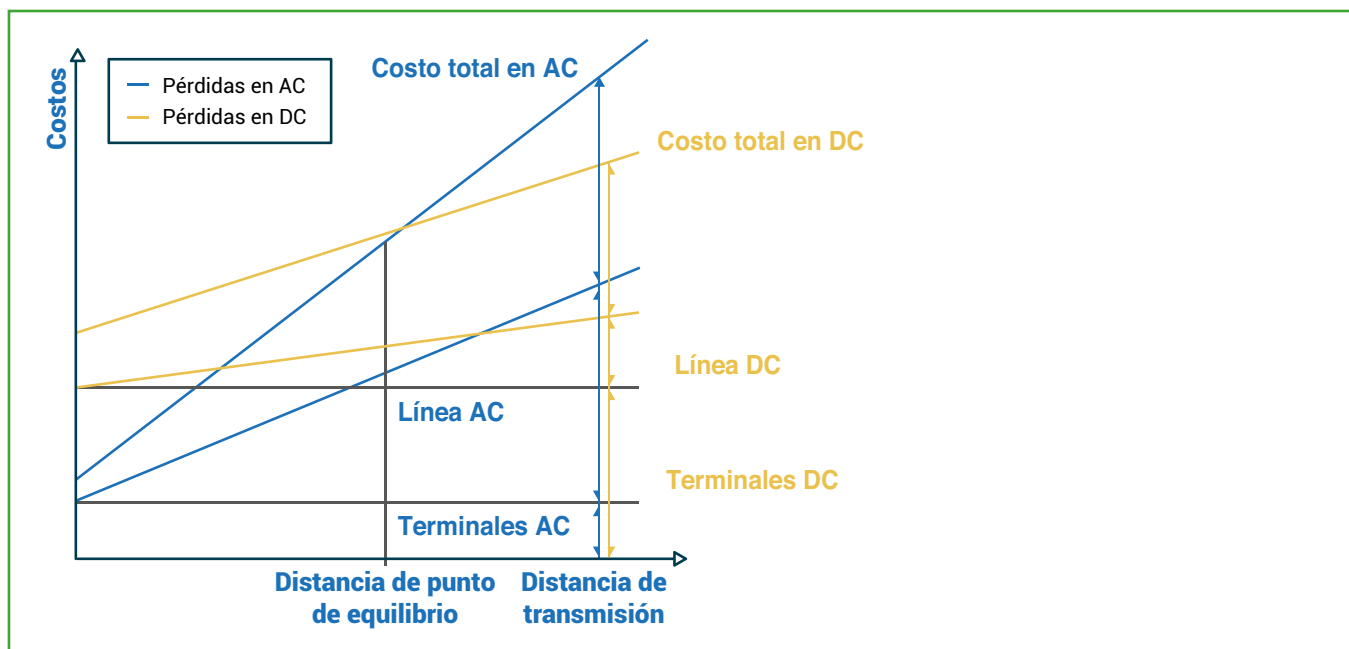


Fuente: (Canelhas et al., 2015)

Análisis de costos.

Uno de los principales factores para tener en cuenta en este tipo de tecnologías es su costo de implementación. En la Figura 10 se comparan los costos entre un sistema HVDC y un sistema HVAC en función de la distancia de transmisión teniendo en cuenta factores como los costos de terminales, costos de líneas o valor de las pérdidas en cada una de las tecnologías.

Figura 10. Comparación de costos sistemas AC vs. DC



Fuente: (Ramamoorthy, 2011)

En la gráfica propuesta por (Ramamoorthy, 2011) se puede observar que las líneas de transmisión en AC presentan costos y pérdidas más bajas que las líneas DC cuando se implementan a cortas distancias. A medida que aumenta la distancia, las curvas van tomando valores más cercanos hasta llegar a un punto de equilibrio (Break – Even distance) que se encuentra entre los 500 km a los 800 km, donde los costos por línea son iguales. Conforme la distancia aumenta las líneas en DC van reduciendo sus costos en comparación con las líneas AC haciéndolas más viables.

En el caso de las pérdidas que se presentan en las líneas de transmisión, las cosas son muy similares entre los sistemas AC y DC, presentando una menor cantidad de pérdidas en los sistemas DC debido a que las líneas de transmisión DC no necesitan compensación de energía reactiva y se tiene que gastar energía en este tipo de compensación. En conclusión, las líneas de transmisión en AC son mucho más viables a cortas distancias y las líneas de transmisión en DC son más viables para largas distancias (Ramamoorthy, 2011).

A continuación, se expone una tabla resumen de todas las ventajas y desventajas que presentan los distintos tipos de tecnología y configuración para la transmisión de energía.

Tabla 5: Comparativo entre los sistemas HVDC y AC.

Tecnologías			Ventajas	Desventajas	Viabilidad económica respecto a AC.
HVDC	Light		El transistor IGBT puede apagar una corriente en cualquier momento. Permite la compensación de energía reactiva en el lado AC de la red de transmisión. Bajas pérdidas. Interconexión asincrónica, que permite conectar redes de transmisión AC de 50 Hz y de 60 Hz. Menor impacto ambiental. Cruce de largas distancias	Aún no está en su máxima fase de desarrollo. Tiene un costo entre el 10 y el 15% mayor a un sistema HVDC clásico.	Para distancias superiores a los 800 km es más viable la construcción de sistemas HVDC.
	VSC	Multi – terminal	Transmisión con varios puntos de conexión. Estabilidad del sistema de transmisión. Gran Capacidad de transmisión. Alta volatilidad. Amplia distribución. Puede seguir funcionando si	Tiene pérdidas considerables en el convertidor de 2% en comparación con los sistemas HVDC LCC de 0,8%. Un control más complejo en	

HVDC	VSC	Multi – terminal	<p>Transmisión con varios puntos de conexión.</p> <p>Estabilidad del sistema de transmisión.</p> <p>Gran Capacidad de trasmisión.</p> <p>Alta volatilidad.</p> <p>Amplia distribución.</p> <p>Puede seguir funcionando si perdiera alguna de las estaciones convertidoras VSC (Cm).</p> <p>Menores perdidas en comparación con los sistemas AC.</p>	<p>Tiene pérdidas considerables en el convertidor de 2% en comparación con los sistemas HVDC LCC de 0,8%.</p> <p>Un control más complejo en comparación con otros sistemas HVDC.</p> <p>En caso de múltiples fallas, reestablecer el sistema tomaría bastante tiempo.</p>	800 km es más viable la construcción de sistemas HVDC.
AC	LCC	Hibrido	<p>Transporte de grandes cantidades de potencia.</p> <p>Perdidas en el convertidor más reducidas que los sistemas VSC convencionales.</p> <p>Control simple.</p> <p>Sin control de retroalimentación secundaria.</p> <p>Control en el momento de sobre corriente en cualquier instante de tiempo.</p>	<p>Necesidad de sistemas AC relativamente fuertes para operar.</p> <p>Son menos convenientes que los sistemas VSC para parques eólicos en el mar.</p> <p>Necesidad de compensación de potencia reactiva lateral.</p> <p>Utilizan cables</p>	Para distancias inferiores a los 500 km es más viable la implementación de sistemas AC convencionales.
	Baja frecuencia		<p>Complementan los sistemas HVAC y HVDC.</p> <p>Permite la conexión asíncrona de sistemas de transmisión.</p> <p>Puede usar los mismos cables de los sistemas AC tradicionales.</p>	<p>Requiere de una estación convertidora para bajar la frecuencia a 2 o 3 Hz al igual que los sistemas HVDC.</p> <p>Funciona como complemento de sistemas ya existentes.</p>	

Fuente: Elaboración propia con base en MacLeod et al., 2010, (Shi et al., 2011), (Fu et al., 2015), (Pegueroles et al., 2015), (Bodin, 2011), (Zambrano & Quishpe, 2013) y (Ramamoorthy, 2011).



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
sistemas de transmisión para la
integración de energías renovables al
sistema de potencia

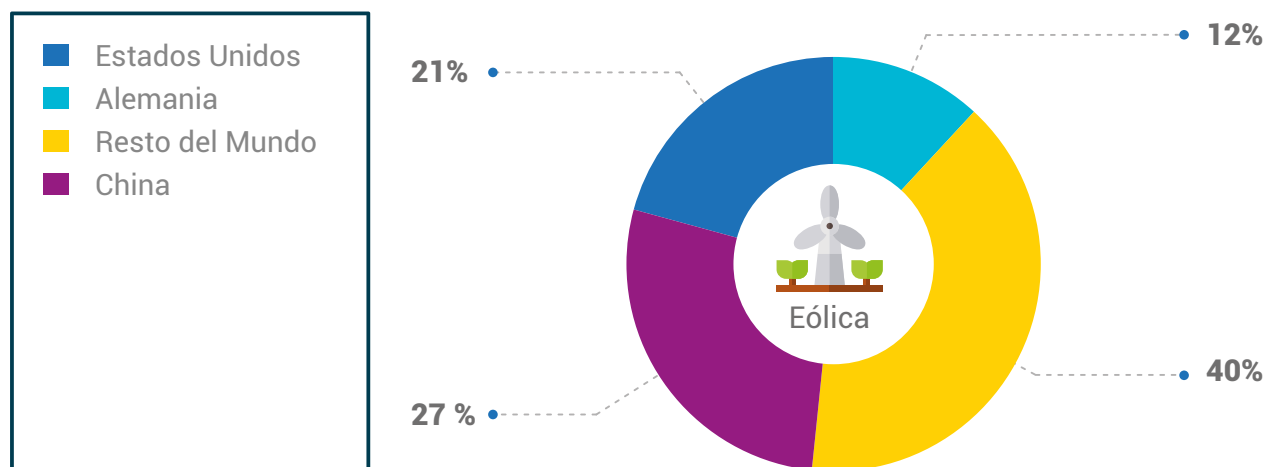
6. Análisis de tendencias en publicaciones científicas

Bogotá
Abril de 2018

5. Tendencias mundiales en tecnologías para la integración de las fuentes renovables al sistema de potencia.

Gracias al desarrollo de las tecnologías de generación eléctrica con fuentes renovables muchos países se han puesto a la tarea de reemplazar sus fuentes de generación buscando beneficios ambientales y energéticos. Entre los países que más se destacan están China, Alemania y Estados Unidos que representan el 60% de la producción de energía eólica en el mundo, tal como se puede observar en la Figura 11. En los siguientes apartados se analiza el estado de las líneas de transmisión para los proyectos de generación con renovables en cada uno de estos países.

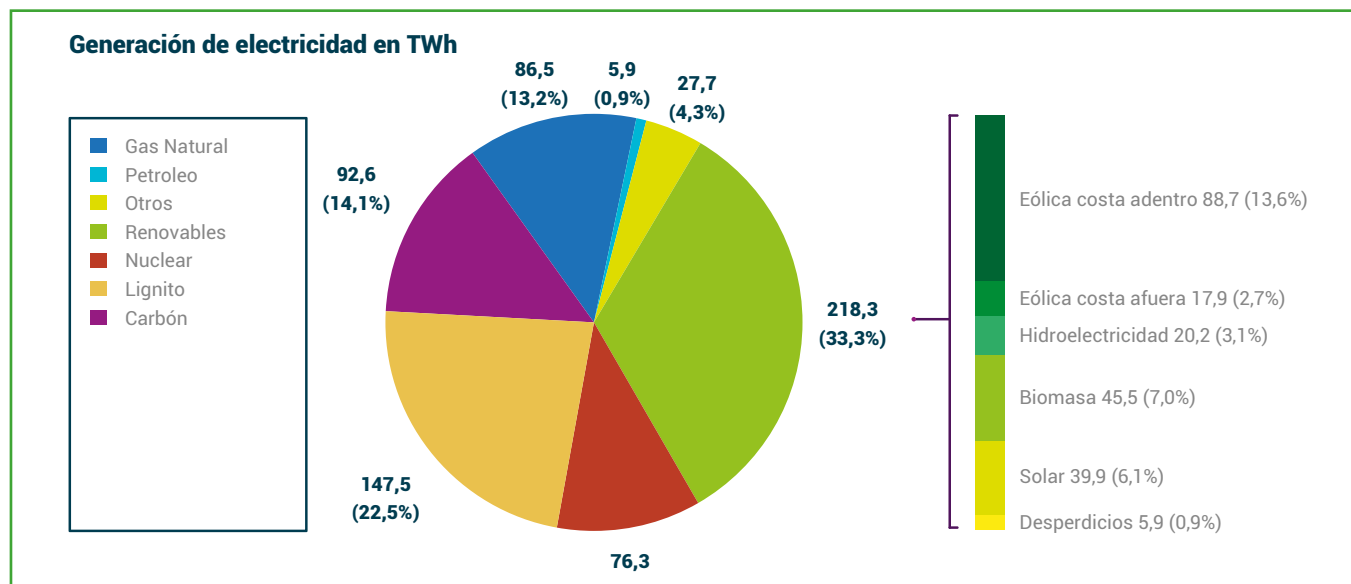
Figura 11. Producción eólica a nivel mundial.



Fuente: (Energy transition, 2016)

Alemania

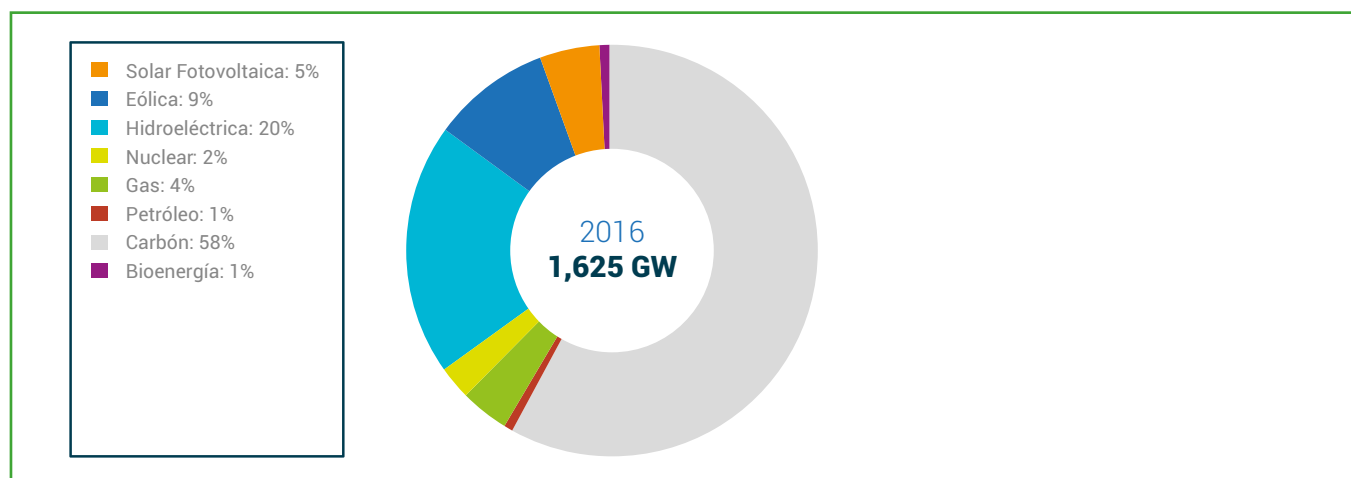
Es uno de los países que lleva la vanguardia en implementación de energía renovable en Europa, con cerca de un 33% del total de la energía producida (ver Figura 12). Adicionalmente, el país tiene proyectado instalar para el 2020 cerca de 7,7GW de energía eólica, y para el 2030 se espera que la capacidad instalada sea de 15 GW en el mar del norte (Wehrmann, 2018). Se espera transportar esta energía mediante la construcción de 3800 Km de líneas de transmisión de alta tensión, 2100 Km de líneas HVDC y 1700 Km de líneas de corriente alterna, con el fin de conectar las costas del mar báltico y el mar del norte con el sur del país (LAROWE & RAIBLE, 2013).

Figura 12. Proporción de fuentes de energía en la producción de energía en Alemania para el 2017

Fuente: ("Share of energy sources in gross german power production in 2017," 2017)

China.

Es uno de los países que más ha invertido en energía renovable, logrando una producción cercana a los 147 GW de capacidad eólica y unos 82 GW de producción con energía solar para el año 2017 lo que representa cerca de un 15% de toda su matriz energética, tal como se puede ver en la Figura 13. Adicionalmente, China espera que para el 2040 su matriz energética aumente la participación de las energías renovables a cerca de un 40%, reduciendo drásticamente la participación de la producción de energía con carbón en un 26% (international energy agency, 2017).

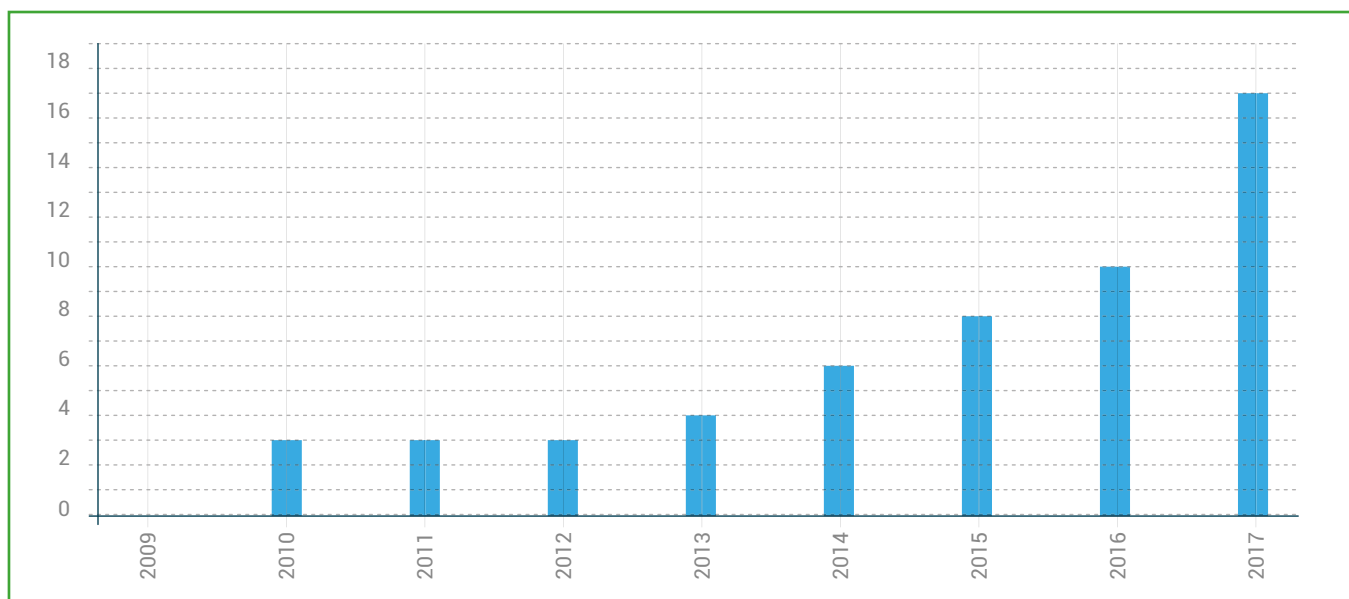
Figura 13. Fuentes de producción de energía en china para el 2016

Fuente: (international energy agency, 2017)

China es el país que lleva la delantera en implementación de energías renovables, con más del 20% de toda la capacidad mundial. Consecuentemente, lleva también la delantera en sistemas de transmisión con una apuesta de cerca de 88 mil millones de dólares. China le apuesta ampliamente

a la tecnología HVDC con un amplio crecimiento en líneas de transmisión en los últimos años. Tal como se puede ver en la figura 14, desde el 2010 el incremento en líneas de transmisión de china ha crecido exponencialmente y se espera que para el 2020 el país llegue a tener 23 líneas de este tipo, que permitan conectar los puntos de generación en lugares remotos con los grandes centros de consumo en las grandes ciudades de china (Anjun, 2017).

Figura 14. Líneas de transmisión en HVDC en China en los últimos años.



Fuente: (Anjun, 2017)

Para junio del 2017 China tenía en construcción y en operación cerca de 30.000 km de líneas de ultra alta tensión, con las cuales en su mayoría se transportaba energía producida con fuentes renovables. Destaca la línea de transmisión de 2.353 km que une la ciudad de Jiuquan con la provincia de Hunan, la cual es posiblemente la línea de transmisión más larga del mundo y transporta energía producida por plantas de generación eólica y solar ("China's major ultra-high voltage transmission lines in smooth operation," 2017).

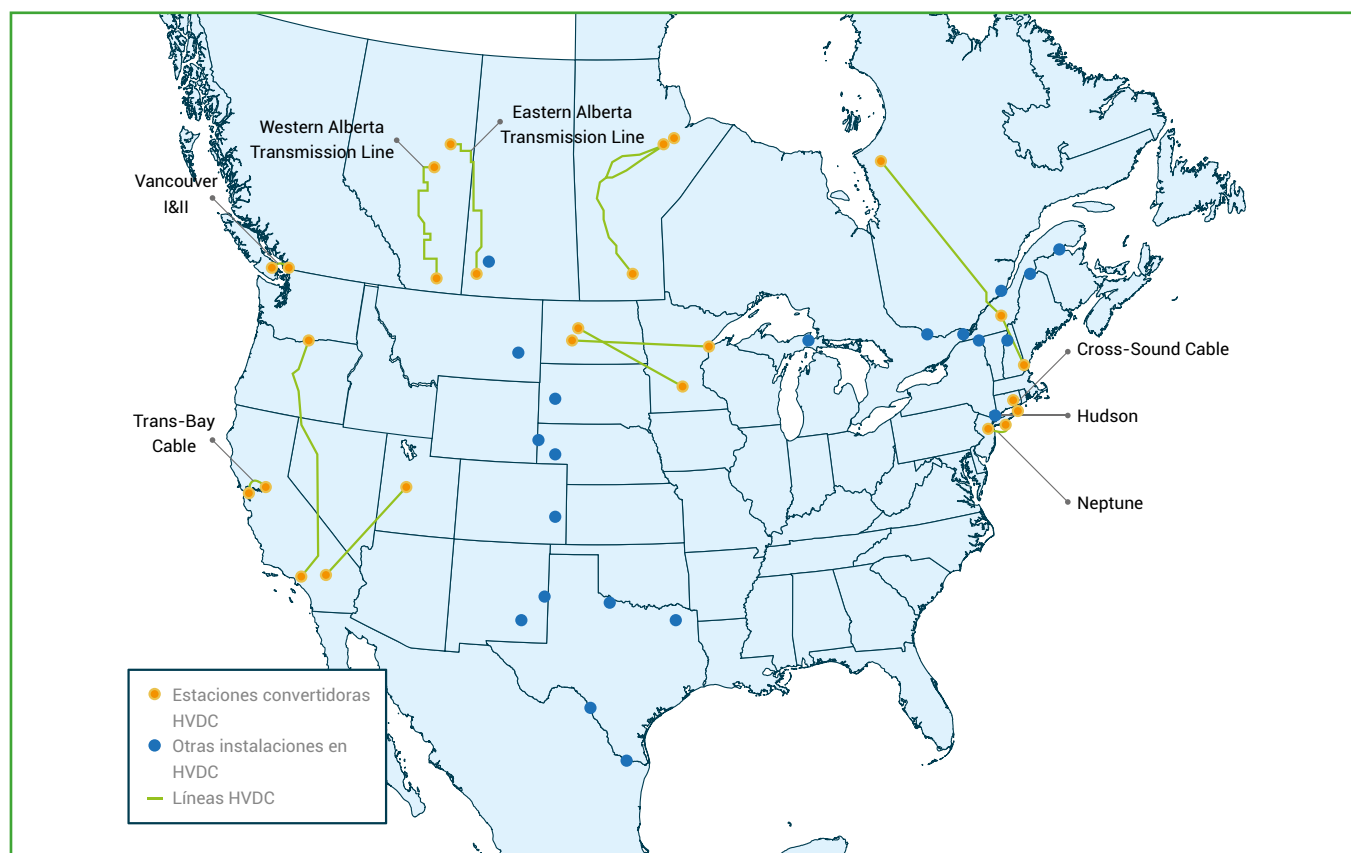
Estados Unidos

La tecnología en DC ha sido usada por varias décadas en Estados Unidos para la interconexión de grandes proyectos hidroeléctricos localizados a grandes distancias de centros poblacionales. El primer proyecto de proporciones importantes y actualmente la instalación más grande en DC es la línea de 500kV 'Pacific DC Intertie', instalada en 1970 para interconectar el río Columbia en Oregon y la ciudad Los Angeles, (Aragüés Peñalba et al., 2013) (Hormona, 2017). En la actualidad, el país cuenta con alrededor de 20 instalaciones en DC centradas principalmente en la utilización de recursos energéticos localizados en zonas remotas (ver Figura 15).

Los proyectos en DC en Estados Unidos se han centrado principalmente en aprovechar energía eléctrica generada por plantas hidráulicas ubicadas en lugares remotos. Las energías renovables representan el 17% de la matriz energética de Estados Unidos y dentro de estas, la energía hidráulica representa el 7,5% y la eólica representa el 6.3% (ver Figura 16). Actualmente se encuentra en construcción el proyecto 'Clean Line', (3.5 GW \pm 600 kV), que representaría el proyecto más importante en DC para Estados Unidos en los últimos 30 años y tiene como fin conectar Oklahoma

con la región central sur de Estados Unidos para aprovechar el potencial de generación eólica en una mayor proporción del país (Aragües Peñalba et al., 2013), (Hormona, 2017), (clean line, n.d.).

Figura 15. Líneas de transmisión en HVDC en Estados Unidos

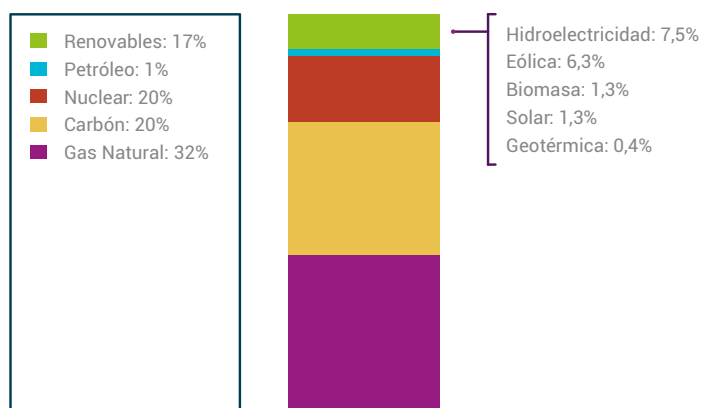


Fuente: ("UNDERSTANDING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS," 1976)

Figura 16. Participación de las diferentes fuentes de energía en la matriz energética de Estados Unidos.

Fuentes de generación de electricidad en Estados Unidos, 2017

Total: 4,01 trillones de kWh



Fuente: (U.S. Energy information administration, 2016)

A satellite view of Earth at night, showing city lights and cloud patterns. The image is used as a background for the document.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
sistemas de transmisión para la
integración de energías renovables al
sistema de potencia

5. Tendencias mundiales en tecnologías para la integración de las fuentes renovables al sistema de potencia

Bogotá
Abril de 2018

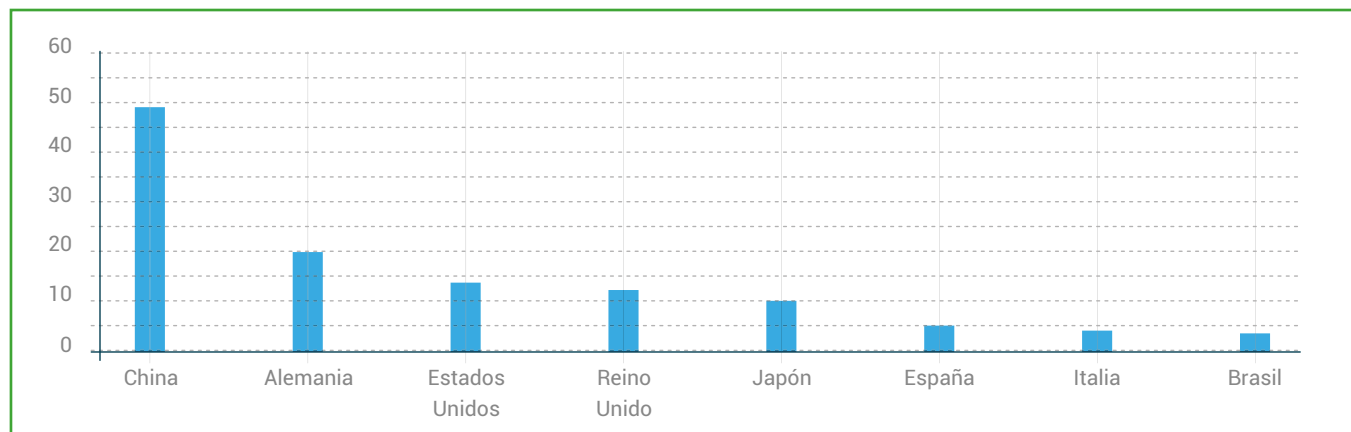
6. Análisis de tendencias en publicaciones científicas

Mediante la elaboración y validación de varias ecuaciones de búsqueda, aplicadas en bases de datos estructuradas y no estructuradas, se logró determinar cuáles son las tecnologías que más fuerza están tomando en la integración de las energías renovables a los sistemas de potencia.

La dinámica de publicación nos muestra que los países líderes son China y Alemania, con más del 50% de las publicaciones. En la figura 17 se puede observar que China toma la delantera en publicaciones enfocadas a los sistemas de transmisión para energías renovable y debido a su creciente implantación de proyectos de energía renovable se puede deducir que China es el país líder en este tipo de sistemas de transmisión.

Alemania por su parte se planteó la meta de cambiar su matriz energética para el 2030 por energía obtenida a partir de fuentes de generación no convencionales. Su liderazgo se observa no solo en la implementación de proyectos con energías renovables sino en la dinámica de investigación, donde se sitúa como el segundo país con más publicaciones y el líder en Europa de este tipo de tecnologías.

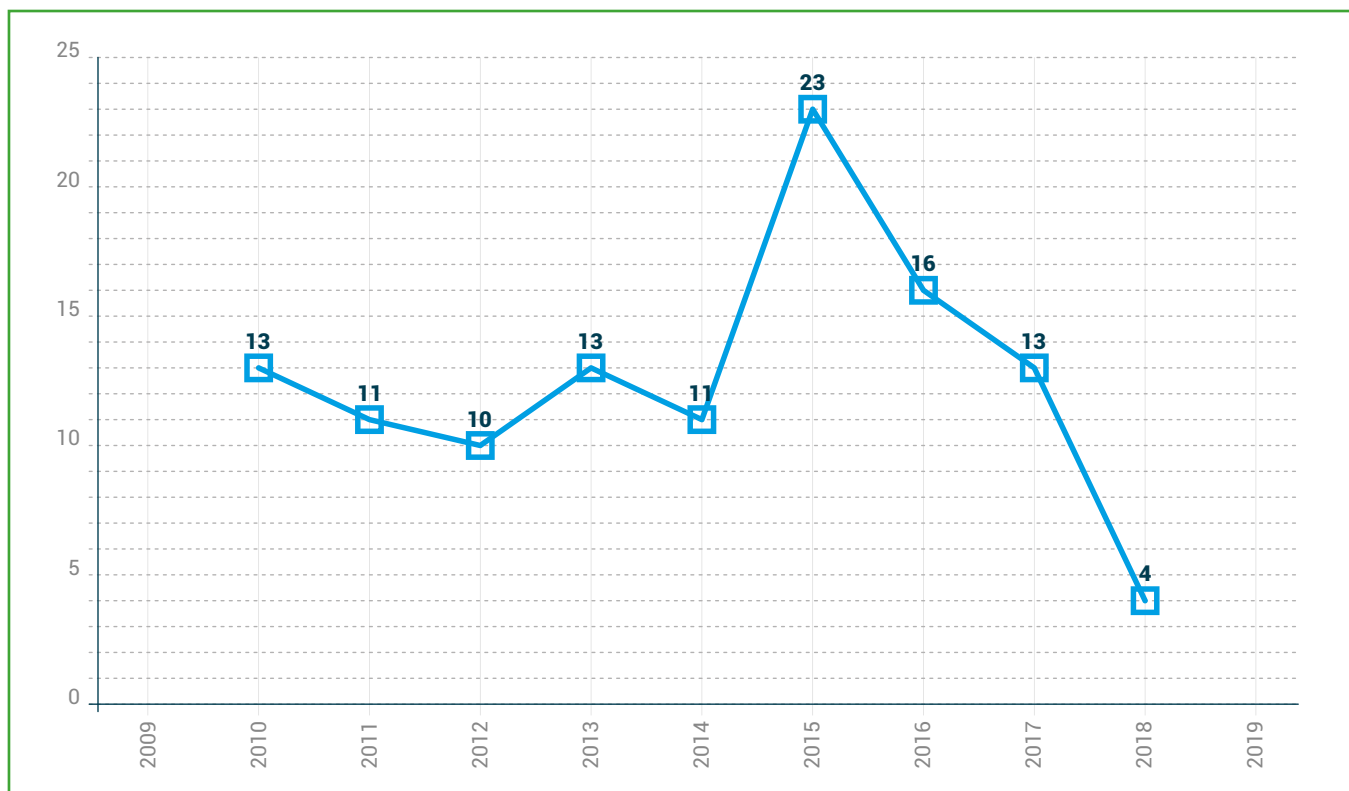
Figura 17. Producción científica por Países en transmisión de energía para proyectos con participación mayoritaria de energía renovable



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar un análisis de la producción de artículos a nivel mundial durante los últimos diez años, es posible notar que se tiene una dinámica de publicación similar con un promedio de 13 publicaciones por año, a excepción del año 2015 en el cual se incrementó a 23 las publicaciones, esto se puede deber al aumento en un 17% de la inversión de China a la producción energética. ("Los países de América Latina que más y menos invierten en energías renovables," 2016).

Figura 18. Producción científica por año en transmisión de energía para proyectos con participación mayoritaria de energía renovable.



Fuente: Elaboración propia.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de Vigilancia Tecnológica en
sistemas de transmisión para la
integración de energías renovables al
sistema de potencia

5. Referencias Bibliográficas



Bogotá
Abril de 2018

5. Referencias Bibliográficas

- Anjun, P. (2017). China's embrace of a new electricity-transmission technology holds lessons for others. Retrieved from <https://www.economist.com/news/leaders/21714350-case-high-voltage-direct-current-connectors-chinas-embrace-new>
- Aragüés Peñalba, M., Prieto Araujo, E., Egea Álvarez, A., Gomis Bellmunt, O., Converters, S., Systems, P., & Guarnieri, M. (2013). HVDC and FACTS Controllers. IEEE Industrial Electronics Magazine, 27(september), 60–63. <https://doi.org/10.1007/b117759>
- Bodin, A. (2011). HVDC Light® - A preferable power transmission system for renewable energies. In Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics, IYCE 2011.
- Canelhas, A., Karamitsos, S., Axelsson, U., & Olsen, E. (2015). A low frequency power collector alternative system for long cable offshore wind generation. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84939244470&doi=10.1049%2Fcp.2015.0095&partnerID=40&md5=668da6f61e12538b53b6304bbb169498>
- China's major ultra-high voltage transmission lines in smooth operation. (2017). Retrieved from <http://chinaplus.cri.cn/news/china/9/20170625/6970.html>
- clean line, energy partners. (n.d.). PLAINS & EASTERN CLEAN LINE. Retrieved from <https://www.plainsandeasterncleanline.com/site/page/project-description>
- Congreso De Colombia. (2014). LEY 1715 Mayo de 2014. Presidencia de La Republica, (May), 26. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Dorn, J., Gambach, H., & Retzmann, D. (2012). HVDC transmission technology for sustainable power supply. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861584901&doi=10.1109%2FSSD.2012.6198109&partnerID=40&md5=8f4f50b954ea9a04f6a4ecab2b716914>
- Energy transition. (2016). Las energías renovables se hacen cada vez más competitivas.
- Fu, Q., Du, W., Cao, J., & Wang, H. F. (2015). VSC-based HVDC power transmission for the large-scale offshore wind power - A survey. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962771138&partnerID=40&md5=4ca0eff6cb6f4f1e7e05a56539fac478>
- Hormona, L. (2017). Readyng for New HVDC Line, U.S. Lags Behind Rest of World. Retrieved from <http://www.powermag.com/readying-new-hvdc-line-u-s-lags-behind-rest-world/>
- International energy agency. (2017). World Energy Outlook 2017: China. Retrieved from <https://www.iea.org/weo/china/>
- LAROWE, A., & RAIBLE, M. (2013). Energy Wise. School Planning & Management. Retrieved from <http://search.ebscohost.com.proxy.seattleu.edu/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=89570875&site=ehost-live&scope=site>

Los países de América Latina que más y menos invierten en energías renovables. (2016). Retrieved from http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160329_ciencia_energia_renovable_inversion_america_gtg

MacLeod, N. M., Barker, C. D., & Kirby, N. M. (2010). Connection of renewable energy sources through grid constraint points using HVDC power transmission systems. In 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484208>

Pegueroles, J., Barnes, M., Gomis, O., Beddard, A., & Bianchi, F. D. (2015). Modelling and analysis of CIGRE HVDC offshore multi-terminal benchmark grid. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969931921&doi=10.1016%2Fj.egypro.2015.11.409&partnerID=40&md5=d73c678d68c8130311de068ff116d94a>

Ramamoorthy, M. (2011). High voltage direct current transmission. Journal of the Institution of Engineers (India): Electrical Engineering Division, 70(2–3), 97–103. <https://doi.org/10.1049/pe:19890020>

Share of energy sources in gross german power production in 2017. (2017). Retrieved from <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

Shi, G., Chen, Z., & Cai, X. (2011). Overview of multi-terminal VSC HVDC transmission for large offshore wind farms. APAP 2011 - Proceedings: 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2, 1324–1329. <https://doi.org/10.1109/APAP.2011.6180584>
Tecnología Eléctrica. (2005). Distribution, 1–168.

U.S. Energy information administration. (2016). Electricity in the United States is produced with diverse energy sources and technologies. Retrieved from https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity_in_the_united_states

UNDERSTANDING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS. (1976). <https://doi.org/10.1017/S0250569X00019580>

Wehrmann, B. (2018). Clean energy wire. Retrieved from <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/german-offshore-wind-power-output-business-and-perspectives>

Zambrano, W. R. A., & Quishpe, L. A. E. (2013). Estudio de las ventajas y desventajas de usar hvdc sobre sistemas de generación eólica. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

Zeng, R., Xu, L., Yao, L., Finney, S. J., & Wang, Y. (2015). -/Hybrid HVDC for Integrating Wind Farms with Special Consideration on Commutation Failure, 1–9.