

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRICA



TRANSMISIÓN EN HVDC PARA GENERACIÓN EÓLICA

Trabajo Dirigido con Opción a Grado

Presentado por :

Carlos Sneyder Otálora Aldana

Director:

Agustín Rafael Marulanda Guerra

Bogotá, diciembre de 2020

Otalora Aldana Carlos Sneyder. Transmisión en HVDC para generación eólica. Trabajo Dirigido con Opción a Grado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Programa de Ingeniería Eléctrica. Bogotá, 2020, 44p.

### RESUMEN

Los sistemas de generación eólica, han tomado gran importancia, debido a que estos sistemas producen una energía más limpia y son una alternativa fuerte para reemplazar a las plantas de generación térmica. Estos sistemas tienen distintas configuraciones y clasificaciones, ya sea que se clasifiquen por la disposición del eje o si se clasifican por su velocidad. Uno de los grandes inconvenientes que podrían tener estos sistemas de generación, es la confiabilidad a la hora de generar energía, este problema se presenta debido a que la velocidad del viento no es constante, esto ocasiona que, en distintos instantes de tiempo, se tenga menor o mayor disponibilidad de energía. Una solución contundente es implementar un sistema de transmisión HVDC, el cual tiene grandes ventajas cuando se trata de transportar energía. La transmisión en HVDC es posible gracias a los convertidores electrónicos de potencia, los cuales cuentan con una etapa de rectificación y una etapa de inversión. Por medio de estos dispositivos se puede controlar el flujo de potencia activa y reactiva que se inyecta a la red, teniendo el control del flujo de potencia, se puede proporcionar una cantidad fija de energía solucionando el problema de confiabilidad que presentaban los aerogeneradores. En el presente documento se usa el programa DigSILENT PowerFactory para modelar un sistema de transmisión HVDC, se observa la contribución de estos sistemas a la red eléctrica y como se puede controlar el flujo de potencia que estos sistemas inyectan a la red.

**Palabras Clave:** Generación, Transmisión, HVDC, aerogeneradores.

carlos.otalora-a@mail.escuelaing.edu.co

Otalora Aldana Carlos Sneyder. Transmisión en HVDC para generación eólica. Trabajo Dirigido con Opción a Grado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Programa de Ingeniería Eléctrica. Bogotá, 2020, 44p.

### ABSTRACT

Wind generation systems have taken on great importance, because these systems produce cleaner energy and are a strong alternative to replace thermal generation plants. These systems have different configurations and ratings, whether they are rated by shaft arrangement or rated by speed. One of the great drawbacks that these generation systems could have is the reliability when generating power, this problem occurs because the wind speed is not constant, this causes that, at different moments of time, it has less or greater availability of energy. A strong solution is to implement an HVDC transmission system, which has great advantages when it comes to transporting energy. Transmission in HVDC is possible thanks to electronic power converters, which have a rectification stage and an inversion stage. By means of these devices, it is possible to control the flow of active and reactive power that is injected into the grid, having control of the flow of power, a fixed amount of energy can be provided, solving the reliability problem that wind turbines presented. In this document, the DigSILENT PowerFactory program is used to model an HVDC transmission system, the contribution of these systems to the electrical network is observed and how the power flow that these systems inject into the network can be controlled.

**Key Words:** Generation, Transmission, HVDC, wind turbines.

carlos.otalora-a@mail.escuelaing.edu.co

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I. EL PROBLEMA</b>	<b>2</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Alcance.....	3
<b>CAPÍTULO II. CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES, CONVERTIDORES DE POTENCIA Y TRANSMISIÓN EN HVDC</b>	<b>4</b>
2.1. Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a la Velocidad.....	4
2.1.1. Aerogeneradores de velocidad fija.....	5
2.1.2. Aerogeneradores de velocidad variable.....	5
2.2. Turbina eólica con generador de inducción.....	6
2.2.1. Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla, arrancador y banco de capacitores.....	6
2.2.2. Generador de inducción y convertidor de potencia.....	7
2.2.3. Generador de inducción de rotor bobinado con deslizamiento controlado.....	8

2.2.4. Generador de inducción doblemente alimentado.....	8
2.3. Turbina eólica con generador sincrónico.....	9
2.3.1. Generador sincrónico de imanes permanentes.....	9
2.3.2. Generador sincrónico de rotor bobinado, excitado por convertidor de potencia.....	9
2.3.3. Generador sincrónico con dos convertidores de potencia.....	10
2.3.4. Generador sincrónico de rotor bobinado con múltiples polos.....	11
2.4. Electrónica de potencia para turbinas eólicas.....	11
2.5. Distribución de un parque eólico.....	14
2.6. Convertidores de potencia.....	15
2.6.1. Convertidor de matriz directa.....	16
2.6.2. Cicloconvertidor.....	17
2.6.3. Convertidor Back to Back.....	18
2.7. Sistemas de transmisión en HVDC.....	19
2.7.1. Conexión simétrica monopolar.....	22
2.7.2. Conexión asimétrica monopolar con retorno a tierra.....	23
2.7.3. Conexión asimétrica con retorno metálico.....	24
2.7.4. Conexión bipolar con retorno a tierra.....	25
2.7.5. Conexión bipolar con retorno metálico.....	25
CAPÍTULO III. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN HVDC	26
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla, arrancador y banco de capacitores.....	7
2	Generador de inducción y convertidor de potencia.....	7
3	Generador de inducción de rotor bobinado con deslizamiento controlado.....	8
4	Generador de inducción doblemente alimentado.....	8
5	Generador sincrónico de imanes permanentes.....	9
6	Generador sincrónico de rotor bobinado, excitado por convertidor de potencia.....	10
7	Generador sincrónico con dos convertidores de potencia.....	10
8	Generador sincrónico de rotor bobinado con múltiples polos.....	11
9	Aerogenerador de velocidad fija con arrancador suave.....	12
10	Electrónica de potencia para generador de rotor bobinado.....	13
11	Electrónica de potencia para aerogenerador de velocidad variable.....	14
12	Distribución de aerogeneradores.....	14
13	Conexión de aerogeneradores.....	15
14	Convertidor de matriz directa.....	17
15	Cicloconvertidor.....	18
16	Convertidor Back to Back.....	19
17	Puente convertidor de 12 pulsos.....	20
18	Esquema VSC básico de dos niveles.....	21
19	Conexión simétrica monopolar.....	23
20	Conexión asimétrica monopolar con retorno a tierra.....	23
21	Conexión asimétrica monopolar con retorno metálico.....	24
22	Conexión bipolar con retorno a tierra.....	25
23	Conexión bipolar con retorno metálico.....	25

24	Diagrama unifilar del sistema AC.....	26
25	Sistema HVDC.....	26
26	Diagrama unifilar del sistema completo en DigSILENT.....	27
27	Sistema HVDC en DigSILENT.....	27
28	Sistema de potencia AC en DigSILENT.....	28
29	Valores nominales del rectificador Y.....	30
30	Valores nominales de los inversores.....	30
31	Flujo de potencia del sistema AC.....	32
32	Flujo de potencia con sistema HVDC.....	33
33	Flujo de potencia entre los nodos 7 y 9.....	33

**LISTA DE TABLAS**

Tabla		Página
1	Nodos del sistema HVDC.....	29
2	Transformadores del sistema HVDC.....	29
3	Líneas del sistema HVDC.....	29
4	Impedancia del estator y reactancia de magnetización.....	31
5	Filtros, capacitores y reactores.....	31



## INTRODUCCIÓN

La transmisión de energía en HVDC actual mente ha tomado gran importancia y esto debido al gran impacto que ha tenido la integración de fuentes no convencionales de energía a la red eléctrica. Las tecnologías que emplean los sistemas HVDC, tienen ciertas características que resultan atractivas para ciertos sistemas de transmisión. Este tipo de transmisión se destaca ampliamente cuando se trata de transportar energía a grandes distancias, suministro de energía a granel e interconexiones asíncronas. Los nuevos diseños de convertidores de potencia han potenciado el rango de transmisión en HVDC, ya sea para aplicaciones subterráneas y en alta mar. Las implementaciones de estos convertidores han permitido llegar a voltajes de transmisión por encima de los 800 kV. Los enlaces HVDC ofrecen una capacidad firme sin limitación debido a la congestión de la red. Los sistemas HVDC se volvieron prácticos y comercialmente viables con la llegada de las válvulas de mercurio de alto voltaje en la década de los años 50. Las válvulas de tiristores de estado sólido se introdujeron a finales de la década de los años 60, lo que dio lugar a diseños de convertidores más simples con menores gastos de operación y mantenimiento. A finales de la década de los años 90, se introdujeron varias tecnologías de conversión que permiten un uso más amplio de la transmisión en HVDC en aplicaciones que en otro modo no podrían considerarse. Entre estas aplicaciones se encuentra la transmisión de energía producida por centrales eólicas, donde se sabe que el flujo de viento no es constante y esto supone un inconveniente, ya que si el flujo de viento está en constante variación la producción de energía también varía dependiendo del viento, bajo esta premisa estos sistemas no son confiables. Las evoluciones de las tecnologías de conversión han permitido que la producción de energía mediante centrales eólicas también evolucione, ya que con las tecnologías de conversión se puede controlar el flujo de potencia de la central hacia la red, esto hace que la generación eólica sea más eficiente y confiable.

## CAPÍTULO I

### TRANSMISIÓN EN HVDC PARA GENERACIÓN EÓLICA

#### 1.1. Planteamiento del Problema

La energía eólica se basa en el aprovechamiento de la energía cinética producida por las corrientes de aire. En la actualidad, la energía eólica se utiliza para generar electricidad, por medio de aerogeneradores, es una energía renovable, limpia, que no contamina. Este tipo de sistema de generación de energía puede proporcionar electricidad a regiones aisladas las cuales no tienen acceso a la red eléctrica.

Unos de los retos que surgen al generar energía con plantas eólicas, es la manera en que se va a transmitir esa energía, la transmisión en HVDC brinda una solución eficaz a este problema. Se sabe que este tipo de transmisión es adecuada para el suministro de grandes cantidades de energía a largas distancias. Por otro lado, la transmisión en HVDC permite interconectar redes asíncronas o desacopladas, es decir sistemas que operan a distinta frecuencia, como es el caso de la generación eólica.

#### 1.2. Objetivos

##### 1.2.1. Objetivo General

Conocer el estado del arte de los sistemas HVDC para la conexión de generación eólica a sistemas de potencia.

##### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Conocer los conceptos más relevantes relacionados con generación eólica.
- Conocer los conceptos relacionados con sistemas de conversión de potencia.
- Conocer las diferentes configuraciones que se usan en los sistemas HVDC.
- Simular un sistema de potencia que conecte una configuración HVDC a un a un sistema de potencia convencional.

### **1.3. Justificación de la Investigación**

Las fuentes no convencionales de energía han tomado fuerza, debido a que estas entregan una energía más limpia y reducen las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Una de las maneras más populares de generación con estas fuentes es la eólica, es importante conocer desde el punto de vista técnico y de la ingeniería, las componentes de un sistema de generación eólico y la forma óptima en que se transmite la energía, de manera que este se pueda conectar a un sistema de potencia convencional.

### **1.4. Alcance**

La investigación desarrollada en este documento, resaltar la importancia la importancia y la utilidad de los sistemas de transmisión HVDC para generación eólica, permitiendo dar una base conceptual de las componentes de estos sistemas y sus diferentes configuraciones.

## **CAPÍTULO II**

### **CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES, CONVERTIDORES DE POTENCIA Y TRANSMISIÓN EN HVDC**

Los sistemas de transmisión de energía a largas distancias son fundamentales para una mayor exploración de los recursos energéticos y un aumento en el comercio de energía. Cuando la energía debe transmitirse mediante líneas largas, la transmisión de alta tensión en corriente continua tiene varias ventajas con respecto a la transmisión de alta tensión en corriente alterna, por ejemplo, transportan mayor potencia por conductor, menos problemas con resonancias y distancia de transmisión que no está limitada por estabilidad.

Los sistemas HVDC tienen distintas aplicaciones, entre ellas se encuentra transmitir la energía producida por aerogeneradores eólicos, estos últimos tienen distintas particularidades y clasificaciones, se pueden clasificar de acuerdo a su velocidad, pueden ser de velocidad fija o variable. También es importante el tipo de máquina que empleen, ya sea de inducción o sincrónica. Cuando se trata de transmitir la energía producida por los aerogeneradores la transmisión HVDC es una de las alternativas más adecuadas, ya que estos sistemas cuentan con dispositivos convertidores de energía con diferentes tecnologías que permiten que el transporte de energía sea más eficiente.

#### **2.1. Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a la velocidad**

Los aerogeneradores pueden clasificarse teniendo en cuenta la velocidad a la que gira el rotor, esta clasificación se divide en dos grupos, los aerogeneradores de velocidad fija y de velocidad variable.

### **2.1.1. Aerogeneradores de velocidad fija**

Esta es la primera y más antigua tecnología desarrollada para las turbinas eólicas. Los aerogeneradores de velocidad fija giran a una velocidad casi constante, esta velocidad se determina por la relación de transmisión, la frecuencia de la red y el número de polos del generador. Este tipo de aerogenerador se conecta a la red mediante un arrancador suave, después del proceso de arranque, el arrancador es desconectado mediante un interruptor y el sistema funciona esencialmente sin ningún convertidor de potencia. Normalmente se requiere una caja de cambios para igualar la diferencia de velocidad entre la turbina y el generador.

Los principales inconvenientes que se presentan en esta configuración incluyen menor eficiencia de conversión de energía eólica, los cambios en la velocidad del viento se reflejan en la red, las fallas de la red provocan un estrés severo en los componentes mecánicos de la turbina eólica. Los inconvenientes anteriormente descritos han hecho que la utilización de estos aerogeneradores ya no sea tan común.

### **2.1.2. Aerogeneradores de velocidad variable**

Los aerogeneradores de velocidad variable pueden mantener la eficiencia en la conversión de energía, esto debido a que a turbina puede ajustar su velocidad de rotación a medida que la velocidad del viento cambia, de esta forma se puede mantener la eficiencia para obtener la máxima potencia a diferentes velocidades. Para esta configuración el generador está conectado a la red eléctrica a través de un convertidor de potencia [1].

Con el convertidor de potencia, el generador se encuentra completamente desacoplado de la red y puede funcionar en todo el rango de velocidad. El convertidor de potencia también permite que el sistema haga una compensación de potencia reactiva y una conexión a la red

sin problemas. La eficiencia de conversión de energía eólica es más alta en estos aerogeneradores en comparación a los de velocidad fija.

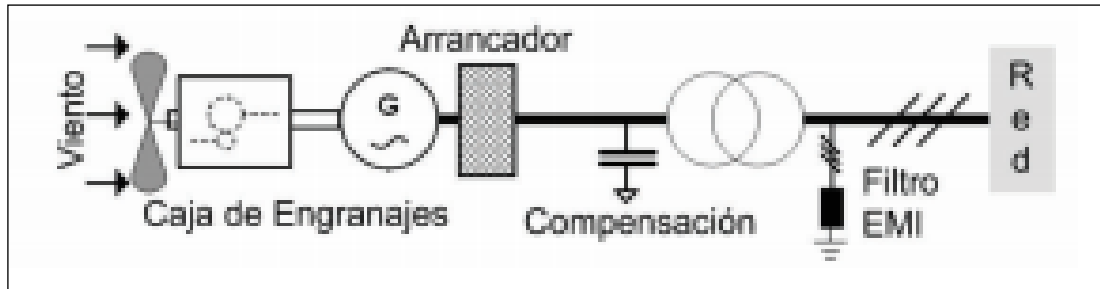
En estas dos configuraciones juega un papel muy importante el tipo de máquina que se usa, la cual puede ser una máquina sincrónica o de inducción, a continuación, se describirán los diferentes sistemas que se pueden presentar, teniendo en cuenta el tipo de máquina que se utilice.

## **2.2. Turbina eólica con generador de inducción**

Los aerogeneradores que emplean la máquina de inducción tienen distintas configuraciones, las cuales se pueden aplicar dependiendo del nivel de potencia al cual se necesita generar, del terreno o según las características del viento, a continuación, se describirá cada uno de los esquemas que emplean las turbinas eólicas con generador de inducción. A continuación, se describe brevemente las distintas configuraciones que se pueden presentar.

### **2.2.1. Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla, arrancador y banco de capacitores**

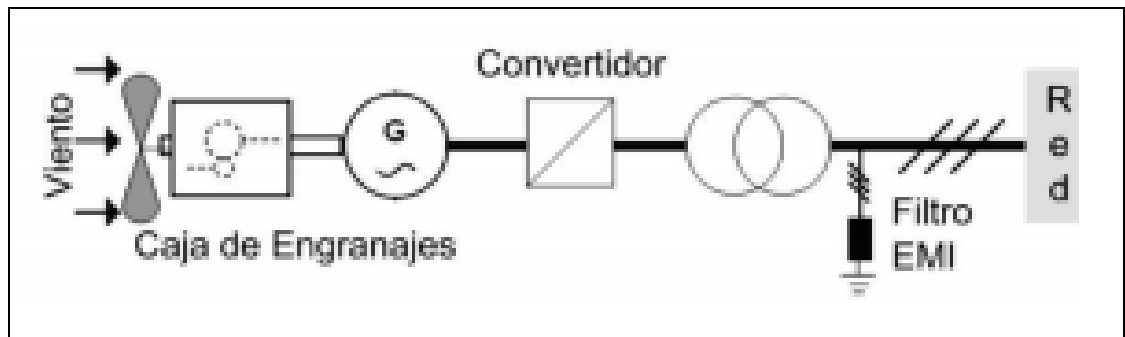
El generador es un generador de inducción con rotor de jaula de ardilla y un banco de capacitores, este último se utiliza para compensar la potencia reactiva que consume el generador de inducción. En este sistema el rotor de la turbina se encuentra conectado al eje del generador por medio de una caja de engranajes, esta caja de engranajes permite que la velocidad a la que gira el rotor del generador sea constante.



**Figura 1.** Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla, arrancador y banco de capacitores [2].

### 2.2.2. Generador de inducción y convertidor de potencia

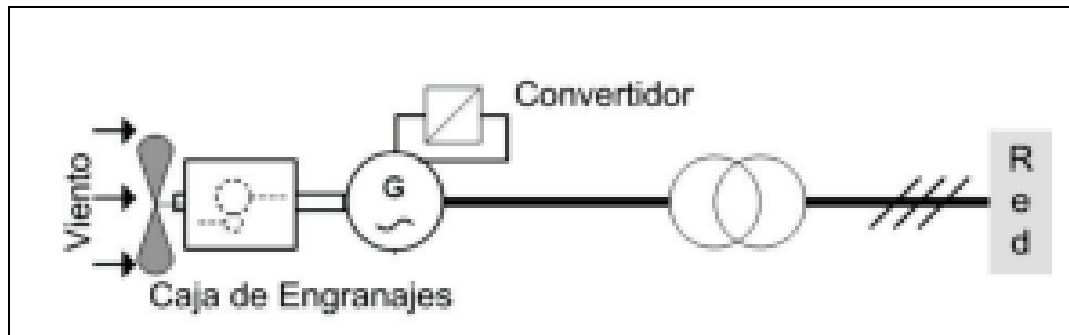
En este caso el generador de inducción genera corriente alterna a frecuencia variable, que luego es transformada en corriente alterna de frecuencia fija por medio del convertidor de potencia. La utilización del convertidor permite que la velocidad a la que gira el rotor del generador varíe en función de los cambios de velocidad del viento.



**Figura 2.** Generador de inducción y convertidor de potencia [2].

### 2.2.3. Generador de inducción de rotor bobinado con deslizamiento controlado

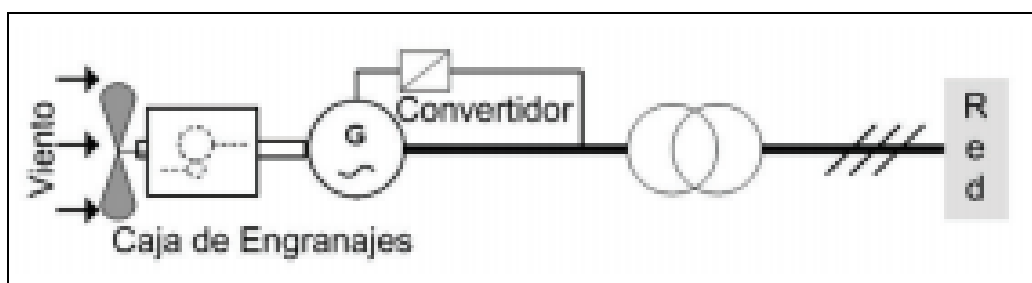
En esta configuración el deslizamiento del generador de inducción depende de la resistencia de los devanados del rotor, por este motivo el deslizamiento se puede variar, alterando la resistencia del rotor. Para hacer esto se conecta el rotor a resistencias variables externas, las cuales son moderadas por medio de un sistema de control electrónico.



**Figura 3.** Generador de inducción de rotor bobinado con deslizamiento controlado [2].

### 2.2.4. Generador de inducción doblemente alimentado

Estos generadores tienen el mismo principio de funcionamiento que los generadores de inducción de rotor bobinado, pero adicionalmente cuentan con un convertidor de potencia que alimenta al rotor. Gracias a ello es posible un control independiente de potencia activa y reactiva, también es posible mejorar la calidad de la potencia entregada a la red, siendo una potencia más estable. Esta configuración está compuesta por dos circuitos, circuito del estator y circuito del rotor, el estator de la máquina se encuentra conectado directamente a la red, mientras que el rotor se conecta a la red mediante un convertidor de potencia.



**Figura 4.** Generador de inducción doblemente alimentado [2].

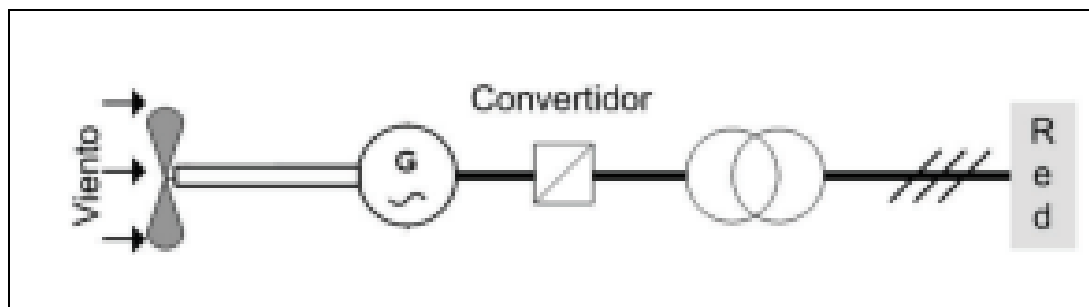


### 2.3. Turbina eólica con generador sincrónico

Las turbinas eólicas que usan un generador sincrónico poseen diferentes configuraciones, que al igual que las anteriormente mencionadas, su aplicación depende del nivel de potencia al cual se necesita generar, del terreno o según las características del viento.

#### 2.3.1. Generador sincrónico de imanes permanentes

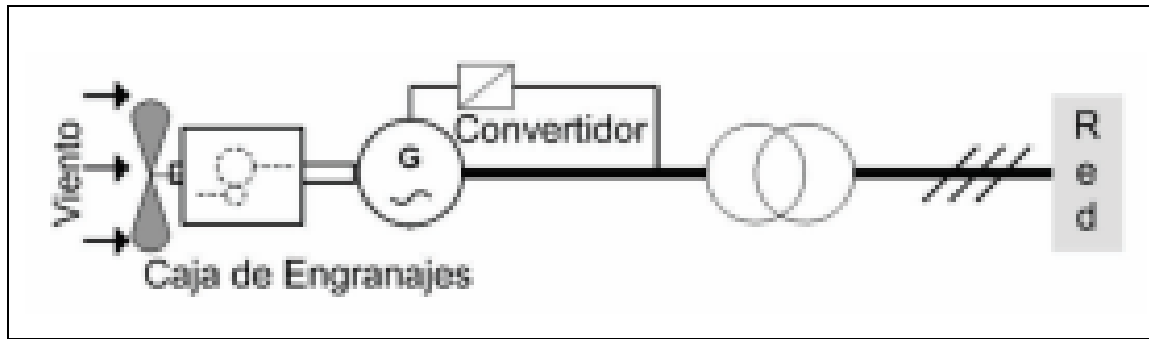
En este esquema la entrada mecánica del generador está conectada directamente a el eje de las palas de la turbina, por lo tanto, no utiliza caja de engranajes, después del generador se encuentra un convertidor de potencia que luego se conecta a la red. Esta configuración es usada mayormente en turbinas eólicas que se encuentran en el mar, cuya potencia nominal es del orden de 3 a 5 MW.



**Figura 5.** Generador sincrónico de imanes permanentes [2].

#### 2.3.2. Generador sincrónico de rotor bobinado, excitado por convertidor de potencia

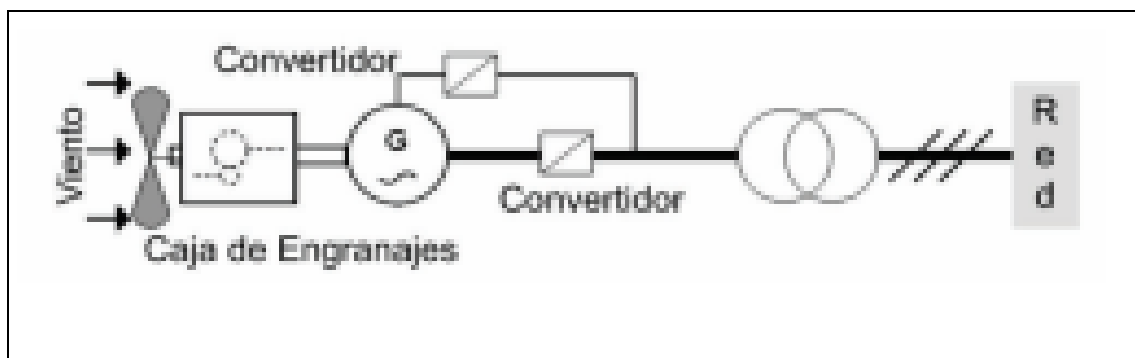
Esta configuración usa un generador sincrónico donde el bobinado del rotor se encuentra excitado con corriente continua, mediante un convertidor de potencia. Este esquema es utilizado en menor medida con respecto al anterior debido a que se necesita un circuito de excitación y la utilización de anillos rozantes para ingresar al bobinado del rotor.



**Figura 6.** Generador sincrónico de rotor bobinado, excitado por convertidor de potencia [2].

### 2.3.3. Generador sincrónico con dos convertidores de potencia

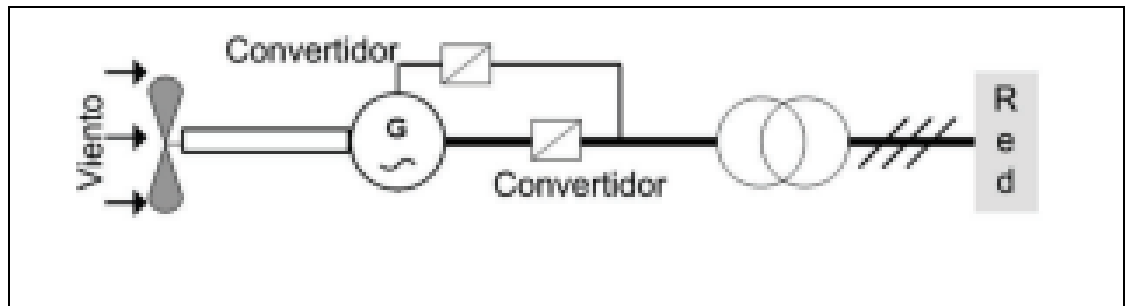
En esta configuración se usa un generador sincrónico de rotor bobinado, este generador es excitado con corriente continua, desde un convertidor de potencia, además se emplea otro convertidor de potencia que transforma corriente alterna a frecuencia variable, en corriente alterna a frecuencia constante. Con este esquema se puede generar energía a diferentes velocidades del viento [2].



**Figura 7.** Generador sincrónico con dos convertidores de potencia [2].

### 2.3.4. Generador sincrónico de rotor bobinado con múltiples polos

Este esquema es similar al anterior, con la diferencia que este generador es de múltiples polos, los cuales pueden estar compuestos de electroimanes o imanes permanentes. El inconveniente principal del uso de generadores de bajo número de polos, es la necesidad de implementar una caja multiplicadora, la cual implementa el peso considerablemente, genera ruido, demanda un mantenimiento regular. Al tener un mayor número de polos, la velocidad de sincronismo es baja y perfectamente compatible con la velocidad del rotor del aerogenerador [2].



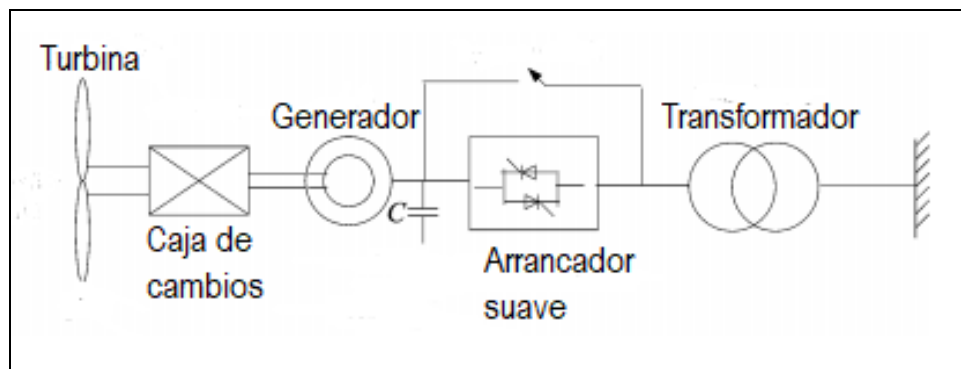
**Figura 8.** Generador sincrónico de rotor bobinado con múltiples polos [2].

### 2.4. Electrónica de potencia para turbinas eólicas

Existen un gran número de soluciones técnicas para los sistemas eléctricos de turbinas eólicas que están relacionados con la electrónica de potencia, ya que pueden mejorar los rendimientos dinámicos y en estado estable de los generadores, además de esto ayuda a controlar los aerogeneradores y desacoplar los generadores de la red [3].

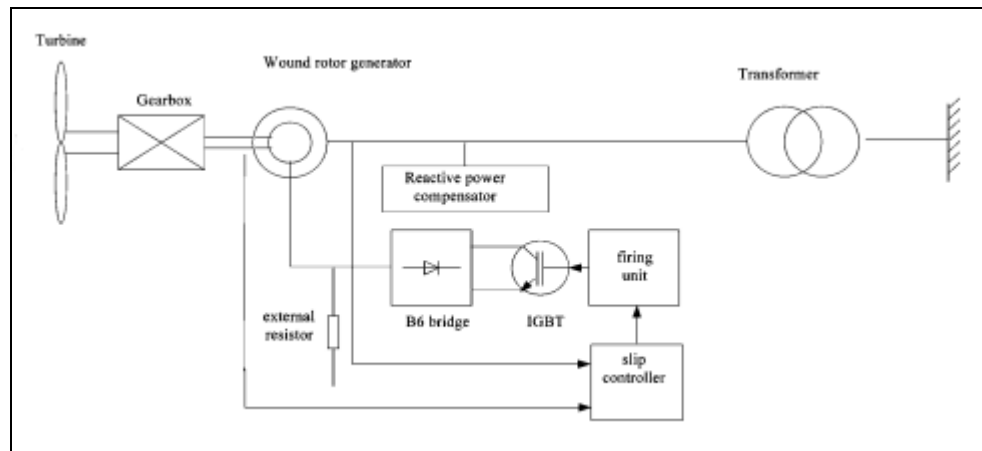
Cuando se trata de aerogeneradores de velocidad fija, la mayoría de ellos se conecta directamente a la red, cuando se usan generadores de inducción, la conexión de estos a la red produce transitorios de corta duración y corrientes de irrupción muy altas, lo que provoca perturbaciones en la red y picos de par altos en el tren de transmisión de las

turbinas eólicas. Las altas corrientes de arranque de los generadores de inducción suelen estar limitadas por un arrancador suave de tiristores. El limitador de corriente o arrancador suave, basado en tecnología de tiristores, limita el valor rms de la corriente de entrada a un nivel por debajo de dos veces la corriente nominal del generador. El arrancador tiene una capacidad térmica limitada y está cortocircuitado por un contactor, que transporta la corriente a plena carga, cuando se ha completado la conexión a la red. Además de reducir el impacto en la red, el arrancador suave también amortigua los picos de par asociados con los picos de corriente, por lo anterior reducen las cargas en la caja de cambios [3].



**Figura 9.** Aerogenerador de velocidad fija con arrancador suave [3].

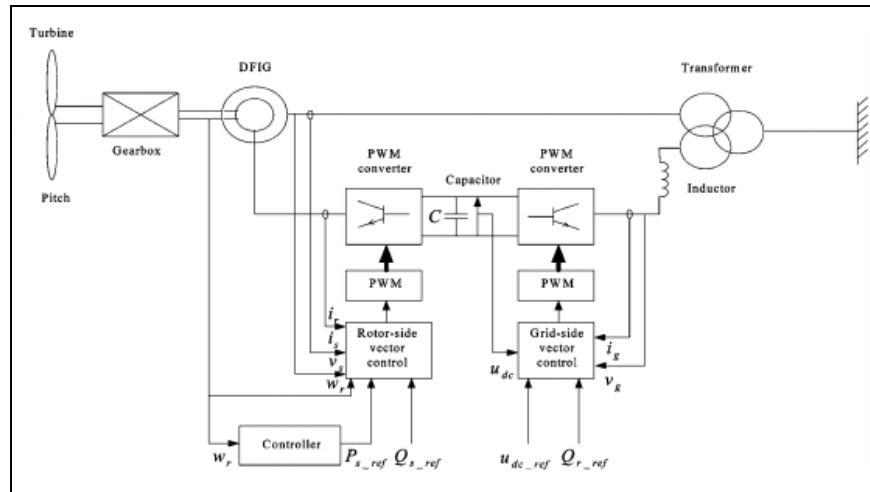
Cuando se trata de aerogeneradores de velocidad variable, entra en juego un dispositivo muy importante para estos sistemas, este dispositivo es el convertidor de potencia. En el caso de que se cuente con un generador de inducción de deslizamiento controlado, los bobinados del rotor están conectados a un grupo de resistencias variables externas. Las resistencias variables se pueden ajustar mediante un sistema de control electrónico como se muestra en la Figura 10. Cuanto mayor es la resistencia de los devanados del rotor, mayor es el deslizamiento. De esta forma la velocidad del generador se puede variar en un rango limitado [3].



**Figura 10.** Electrónica de potencia para generador de rotor bobinado [3].

Cunado se tiene un generador de inducción doblemente alimentado, el estator del generdor está conectado directamente a la red, mientras que el rotor está conectado a la red mediante un convertidor de potencia. El deslizamiento del generador varía en función de la potencia que fluye a través del convertidor. Controlando la potencia activa del convertidor, es posible variar la velocidad del rotor y, por lo tanto, la velocidad del rotor de la turbina eólica. Los convertidores electrónicos de potencia para aerogeneradores de velocidad variable tiene la capacidad de controlar tanto la potencia activa como reactiva entregada a la red. Esto ofrece la posibilidad de optimizar la integración a la red con respecto a las condiciones de régimen permanente, la calidad de energía, el voltaje y la estabilidad angular.

El sistema de control de un aerogenerador de velocidad variable con generador doblemente alimentado funciona principalmente para ajustar la potencia extraída de la turbina eólica, limitar la potencia en el caso de fuertes velocidades del viento, regular la potencia reactiva intercambiada entre el aerogenerador y la red. Se adopta un enfoque de control vectorial para el controlador del rotor, mientras que dos controladores de acoplamiento cruzado ajustan la velocidad y la potencia del sistema. Todo esto con el objetivo de lograr una operación óptima [3].

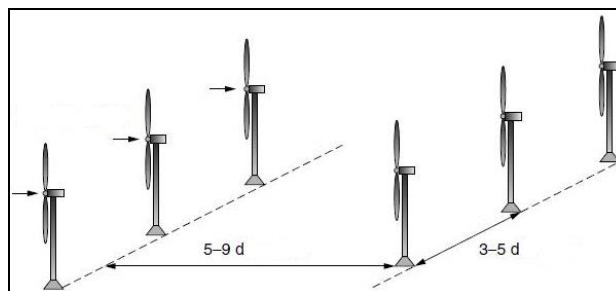


**Figura 11.** Electrónica de potencia para aerogeneradores de velocidad variable [3].

## 2.5. Distribución de un parque eólico

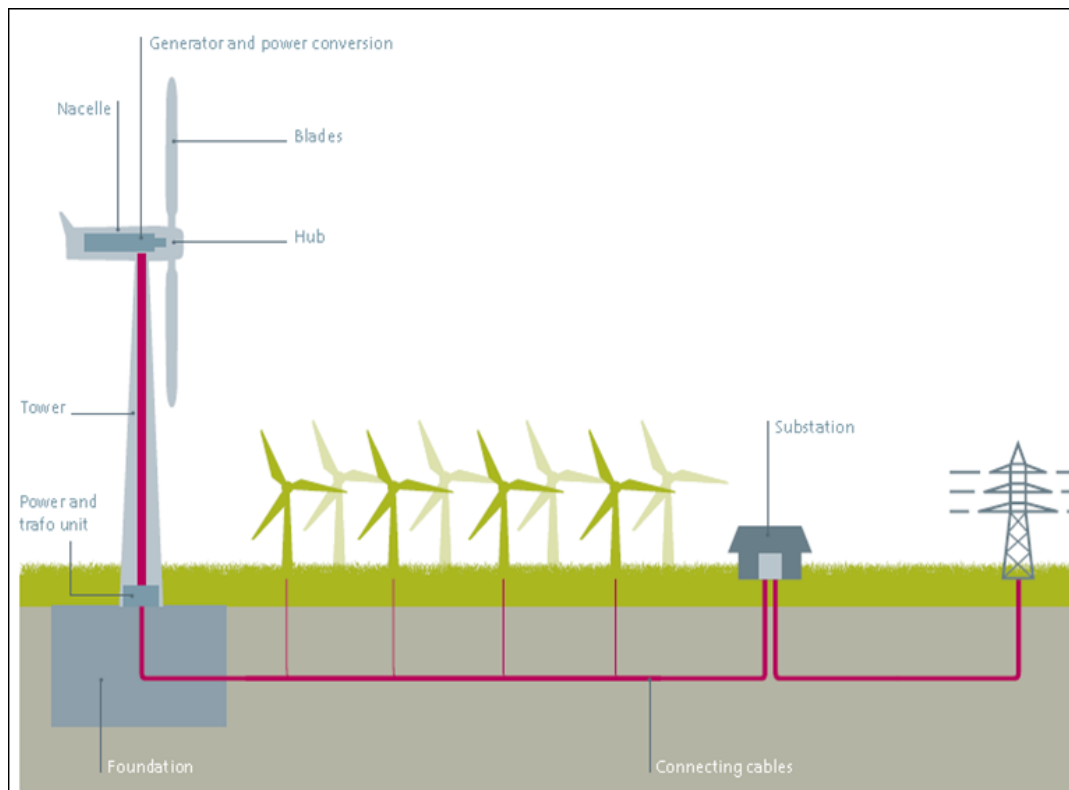
En un parque eólico los aerogeneradores son colocados a distancias adecuadas entre ellos, para que no se interfieran entre si aerodinámicamente, también se busca optimizar el uso del terreno en función de la exposición al viento.

Como regla general, la separación entre los aerogeneradores de un parque eólico, en la dirección predominante del viento, es de 5 a 9 diámetros de la circunferencia que se forma al girar las aspas de un aerogenerador, y de 3 a 5 diámetros en dirección perpendicular a los vientos dominantes [4]. La configuración anteriormente descrita se puede apreciar en la Figura [9].



**Figura 12.** Distribución de aerogeneradores [5].

Los aerogeneradores están conectados por medio de cables subterráneos a un mismo nodo, el cual posteriormente se conecta a una subestación eléctrica, la cual permite que el parque eólico se conecte a la red. La conexión eléctrica entre los aerogeneradores se puede observar en la Figura 13.



**Figura 13.** Conexión de aerogeneradores [6].

## 2.6. Convertidores de potencia

La tecnología de conversión eficiente de energía eléctrica, juega un papel muy importante en los sistemas de energía eólica. Es una parte fundamental para la integración de las unidades de generación de energía eólica de velocidad variable para lograr una alta eficiencia y alto rendimiento en los sistemas de energía. Incluso estas tecnologías pueden ser usadas en aerogeneradores de velocidad fija, donde estos se encuentran conectados directamente a la red, en estos casos los tiristores que componen los convertidores de

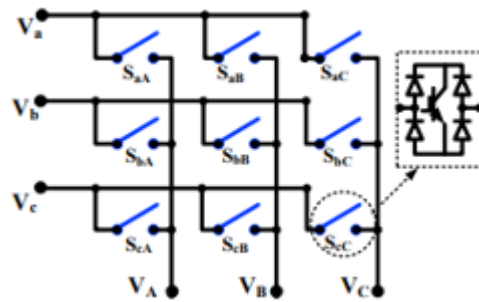
potencia, funcionan como arrancadores suaves. Los convertidores de potencia se utilizan para hacer coincidir las características de los aerogeneradores con los requisitos de conexión a la red, incluyendo tensión, frecuencia, armónicos y control de potencia activa y reactiva. Existen varios tipos de convertidores en algunos de ellos se emplea una etapa de corriente continua y en otros no es necesaria esta etapa. A continuación, se presentan los convertidores más usados en aerogeneradores y sus diferentes tecnologías.

### **2.6.1. Convertidor de matriz directa**

Este convertidor es capaz de transformar señales AC de frecuencia variable, en señales AC de frecuencia constante en una sola etapa. Estos dispositivos están basados en una matriz formada por nueve interruptores bidireccionales, los cuales permiten conectar cualquiera de las tres líneas de entrada con cualquiera de las tres líneas de salida. La forma de onda de salida es cercana a la sinusoidal. El elemento clave en el convertidor de matriz directa es el control de los interruptores bidireccionales que operan a alta frecuencia. Estos son controlados, de tal manera que el convertidor entrega a la carga un voltaje de amplitud y frecuencia variables. Uno de los problemas de este dispositivo es que el costo de los semiconductores es elevado, ya que se necesitan 18 conmutadores en total [7].

Debido a la gran cantidad de conmutadores la confiabilidad del sistema se reduce. Esta configuración también requiere de un sistema de control y de modulación complejos. Para el correcto funcionamiento del convertidor se requieren de ciertos elementos adicionales. Entre estos elementos, el convertidor requiere de filtros de entrada para reducir los armónicos que se generan por la frecuencia de conmutación de los interruptores, por otro lado, se requieren circuitos de protección que eviten posibles sobretensiones que puedan dañar el convertidor [8][9].

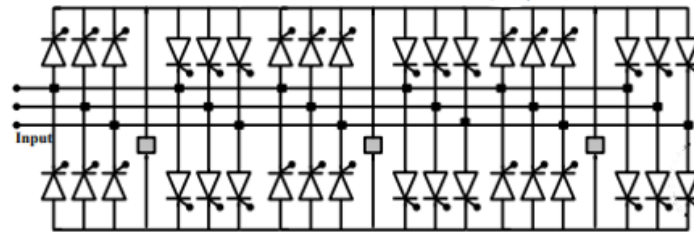




**Figura 14.** Convertidor de matriz directa [7].

### 2.6.2. Cicloconvertidor

Esta configuración al igual que la anterior, convierte señales AC de frecuencia variable, en señales AC de frecuencia constante, sin necesidad de una etapa intermedia DC. Funciona mediante la conmutación de los tiristores que lo conforman, la onda de salida se va construyendo por segmentos de la onda de entrada. Existen principalmente dos tipos de funcionamiento en los cicloconvertidores, en primer lugar, están los cicloconvertidores en modo bloqueo, en los cuales las componentes que deja pasar la parte positiva de la onda de entrada proporcionan una tensión cuando hay una carga positiva actual. En ese momento las componentes que filtran la parte de la onda negativa estarán bloqueadas, de la misma manera funciona cuando se activan las componentes que filtran la parte negativa de la onda de entrada. Estos convertidores son los más utilizados, ya que el costo y el tamaño de estos son bajos. En segundo lugar, están los cicloconvertidores de corriente circulante, en este caso tanto la componente positiva como negativa están en funcionamiento, como ambas etapas están en funcionamiento entonces se produce una corriente circulante, la cual es unidireccional ya que los tiristores que componen estos convertidores permiten el paso de corriente en una sola dirección. La forma de onda exacta de la tensión de salida de los cicloconvertidores depende del número de pulsos del convertidor, la razón de salida a una frecuencia de entrada y el nivel relativo de la tensión de entrada [7][10].

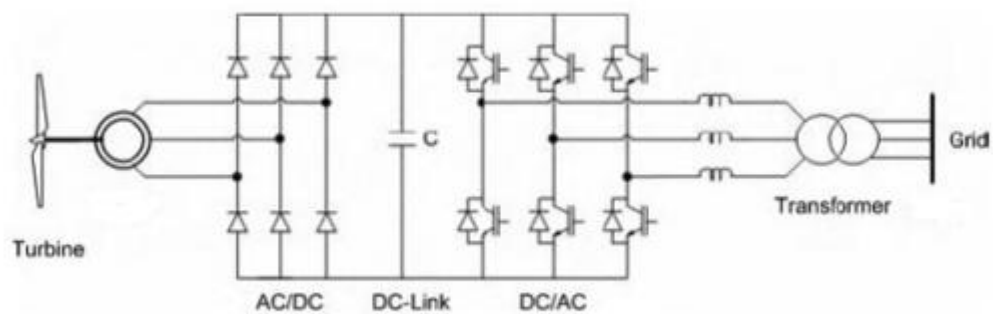


**Figura 15.** Cicloconvertidor [7].

### 2.6.3. Convertidor Back to Back

Esta configuración permite la conexión de sistemas que tienen distinta frecuencia. Este dispositivo se compone de una etapa de rectificación y de un inversor DC/AC como se muestra en la Figura 16. Este esquema permite un control rápido y eficaz del flujo de potencia [11]. En los sistemas HVDC convencionales, se utilizan convertidores de potencia basados en tiristores, también conocidos como convertidores de conmutación por línea (LLC). Los convertidores LLC presentan algunas limitaciones técnicas como el hecho de que el proceso de conmutación es conducido por un voltaje AC, por lo cual este requiere de una fuente AC estable para evitar fallas en los tiristores. Estos convertidores también generan armónicos de bajo orden debido a que la conmutación de las válvulas de los tiristores se realiza a baja frecuencia, lo cual obliga al uso de filtros para eliminarlos. Actualmente debido al desarrollo de dispositivos semiconductores que están en capacidad de manejar grandes potencias y que pueden ser totalmente controlados, se encuentra una nueva configuración basada en el convertidor de fuente de voltaje (VSC), también conocido como convertidor autocontrolado. Los convertidores basados en VSC son los más usados actualmente, debido a que ofrecen soluciones a los problemas que se presentan con los convertidores LLC. Con el uso de los convertidores VSC la estabilidad del sistema de transmisión puede ser mejorada, debido a que con esta configuración se puede controlar el flujo de potencia activa y reactiva, además este control es bidireccional e independiente una de la otra. La configuración VSC utiliza dispositivos semiconductores que tienen la capacidad de ser totalmente controlados en vez de los tiristores que solo permiten el control

de su encendido. El semiconductor más usado en los convertidores VSC es el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), algunas de las características de estos semiconductores son que se controlan por voltaje y no por corriente, tienen bajas pérdidas por conmutación y además tienen capacidad bidireccional de bloqueo de voltaje. Estos convertidores emplean técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM) con las cuales se controla el convertidor, esto con el fin de crear una forma de onda deseada controlando su magnitud, fase y frecuencia [12][13].



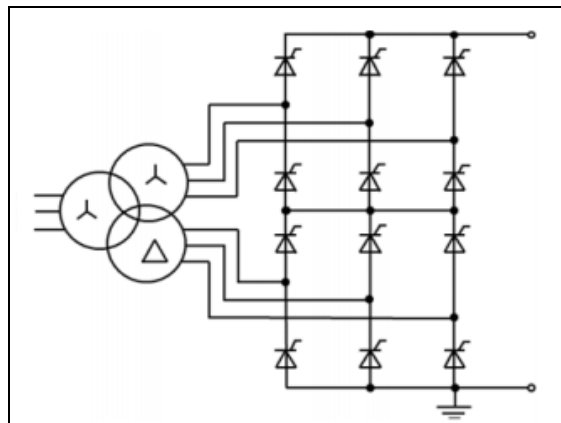
**Figura 16.** Convertidor Back to Back [14].

## 2.7. Sistemas de transmisión en HVDC

Cuando se trata de transmitir energía a largas distancias, los sistemas HVDC suelen ser una alternativa más económica que los sistemas en AC, esto debido a que se reducen las pérdidas de energía. Estos sistemas son la única forma factible de interconectar dos redes desacopladas. Es posible realizar transferencia de energía a largas distancias utilizando menos líneas con transmisión HVDC que con transmisión en AC. La primera transmisión comercial HVDC se hizo en la isla de Gotland en Suecia en 1954 a través de un cable submarino. Las estaciones convertidoras en ese momento usaban válvulas de arco de mercurio como elemento clave, el filtrado se hacía con filtros simples sintonizados, con componentes sumergidos en aceite. El control era estrictamente análogo y con solo las

funciones esenciales, dejando muchas otras al operador. Los cambios más importantes desde entonces, se comentan a continuación [15].

Las válvulas de arco de mercurio de los primeros proyectos, evolucionaron a válvulas de tiristores, el primer proyecto comercial con válvulas de tiristores fue nuevamente en Gotland y se puso en marcha en 1970. La tensión por cada convertidor era de solo 50 kV en corriente continua. Para hacer más eficiente el proceso de conversión, se desarrollaron válvulas con tiristores de activación ligera, con la idea de simplificar las unidades de control de los tiristores. Estos dispositivos también conocidos como convertidores LLC han sido la única solución durante muchas décadas y siguen siendo la primera opción para transmisión de energía de 1000 a 2000 MW y un poco más. Se basan en configuraciones de puente convertidor de 6 pulsos, dos de los cuales están normalmente conectados para construir un puente de 12 pulsos como se muestra en la Figura 17 [15][16].

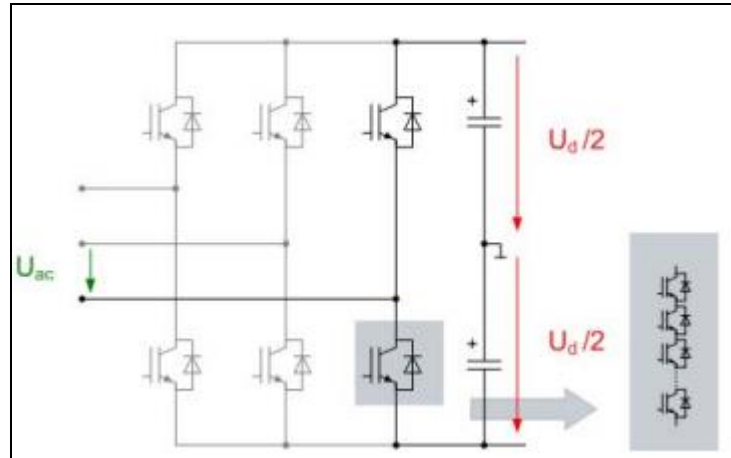


**Figura 17.** Puente convertidor de 12 pulsos [16].

Los esquemas HVDC basados en tecnología LLC absorben potencia reactiva de la red a la que se conectan, debido a que la conmutación de las válvulas es impulsada por la red eléctrica a la que se conecta. La potencia reactiva mencionada debe compensarse mediante bancos de condensadores conmutados en el lado de AC. Según la configuración del convertidor y el comportamiento del tiristor, la corriente puede fluir en una sola dirección, independientemente de la dirección del flujo de potencia. Por lo tanto la polaridad de los voltajes DC debe cambiarse con la dirección de el flujo de energía. Los cables DC con

aislamiento de polietileno no son adecuados para inversiones de polaridad rápidas, por lo que se usan cables impregnados de masa.

Por otra parte se han desarrollado valvulas basadas en transistores bipolares de compuerta aislados en aceite (IGBT). Este tipo de semiconductores son la primera opción para los convertidores VSC, debido a su excelente capacidad de control y su capacidad para limitar una corriente de cortocircuito y posteriormente apagarla. Para lograr una capacidad de hasta varios cientos de kilovoltios, un gran número de dispositivos IGBT se conectan en serie donde cada semiconductor compone un nivel, en la Figura 18 se muestra un esquema de dos niveles [16].



**Figura 18.** Esquema VSC básico de dos niveles [16].

Un hito en la tecnología VSC fue el desarrollo y la introducción del convertidor modular multi nivel (MMC). Este tipo de convertidor, consta de mas de dos niveles de dispositivos IGBT conectados en serie, donde cada nivel puede funcionar como una fuente de voltaje controlada, en consecuencia se pueden obtener voltajes AC sinusoidales y voltajes DC suaves. La tecnologia VSC presenta varias ventajas en comparacion a la LCC, algunas de estas son:

- El convertidor VSC puede controlar de forma independientes la potencia activa y reactiva, es decir, también puede proporcionar potencia reactiva a la red en la cual se conecta.
- Ofrece un excelente comportamiento dinámico, es decir, la capacidad de reaccionar rápidamente ante perturbaciones o de ajustar la potencia activa o reactiva.
- Cuenta con pocos requisitos de espacio.

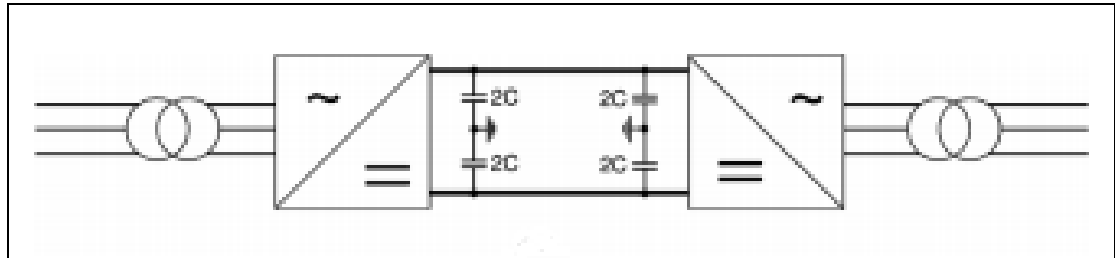
La conmutación forzada con VSC permite el arranque en negro, es decir, el convertidor puede usarse para sintetizar un conjunto balanceado de voltajes trifásicos como un generador sincrónico virtual. Los atributos antes mencionados, hacen que la tecnología VSC sea la mas adecuada en ciertas aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones son: (i) El cableado subterráneo ya que los cables extruidos que se usan son mas livianos y flexibles a comparación de los cables usados en la transmisión HVDC convencional, (ii) transporte de energía a islas remotas por medio de cables submarinos, (iii) la transmisión VSC es compacta y puede alimentar cargas de producción o transporte en plataformas marinas de petróleo o gas desde la costa, (iv) el soporte de voltaje dinámico y la estabilidad de voltaje que ofrecen los convertidores basados en VSC permiten la interconexión de redes asíncronas o de distinta frecuencia, (v) los grandes conjuntos de generación eólica requieren un sistema colector, soporte de energía reactiva y transmisión de salida. La transmisión para la generación eólica comúnmente debe atravesar áreas de difícil acceso o cuerpos de agua. La transmisión HVDC basada en VSC permite el uso eficiente de cables terrestres o submarinos y proporcionar soporte reactivo a los sistemas de generación eólica [16][17].

Independientemente de la tecnología del convertidor, existen dos topologías principales para la transmisión HVDC, las cuales son monopolar y bipolar. A continuación se dará una breve explicación de las diferentes topologías que se pueden encontrar en estos sistemas.

### **2.7.1. Conexión simétrica monopolar**

Esta configuración no utiliza conexión a tierra en la etapa de corriente continua, los capacitores de enlace de corriente continua están conectados a tierra en su punto medio.

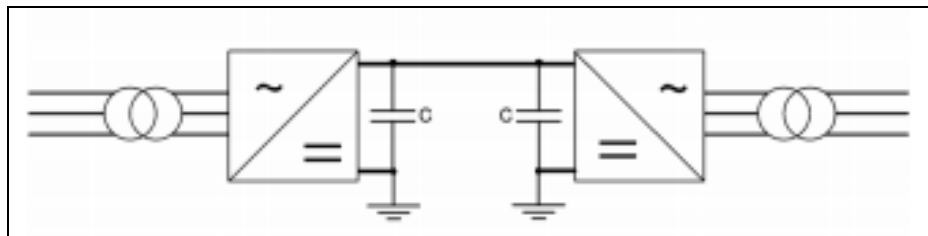
Debido a su simetría, esta es la única topología donde el transformador AC no está sujeto a tensiones DC, lo que simplifica su diseño. Además, es la única topología en la que, en el caso de una falla línea a tierra, el lado DC no es alimentado por corrientes del lado AC. Sin embargo, tiene costos más altos ya que requiere de dos conductores completamente aislados [18].



**Figura 19.** Conexión simétrica monopolar [18].

### 2.7.2. Conexión asimétrica monopolar con retorno a tierra

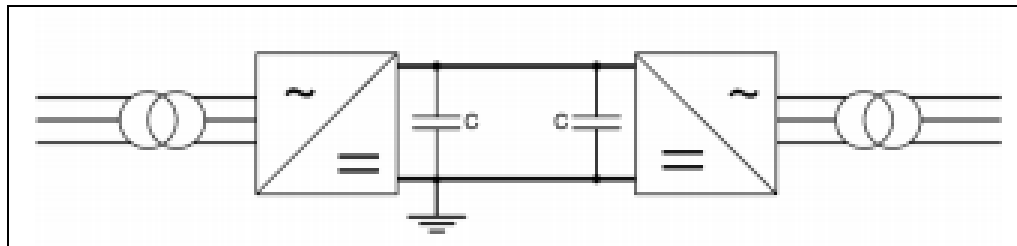
Esta topología es ventajosa desde la perspectiva de los costos, debido a que solo se necesita un solo conductor completamente aislado y tiene la posibilidad de expandirse a una topología bipolar si se requiere. Sin embargo, requiere permiso para la instalación de electrodos que conduzcan corrientes DC a tierra, esto puede generar preocupaciones ambientales [18].



**Figura 20.** Conexión asimétrica monopolar con retorno a tierra [18].

### 2.7.3. Conexión asimétrica monopolar con retorno metálico

En esta configuración el retorno se realiza por medio de un conductor metálico, que no requiere aislamiento de alta tensión, este cable luego es conectado a un sistema de puesta a tierra simple. Esta topología se puede expandir fácilmente a bipolar. Esta configuración se usa en áreas donde no es apropiado el retorno terrestre. Este caso pueden ser áreas muy congestionadas, donde se presenten cruces de cables o terrenos con alta resistividad [18].



**Figura 21.** Conexión asimétrica monopolar con retorno metálico [18].

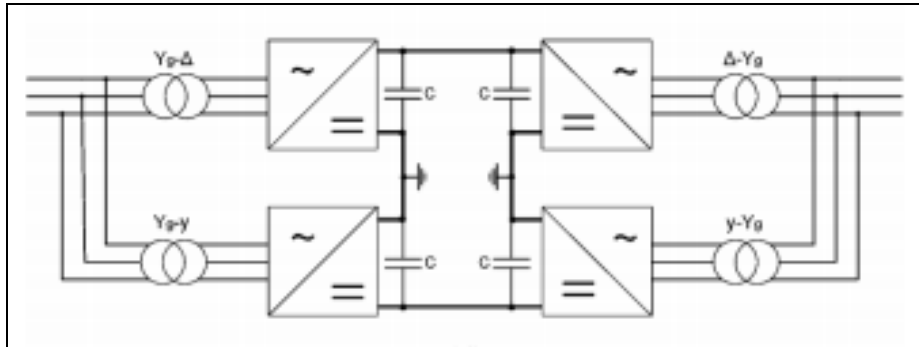
Todas las topologías HVDC monopolares carecen de redundancia, ya que en el caso de una falla de corriente continua, todos los terminales se ven afectados por las altas corrientes de falla. Esto se puede mitigar implementando métodos de protección selectiva que puedan aislar la línea HVDC defectuosa.

La configuración bipolar emplea al menos dos convertidores en cada terminal de la red, lo que la convierte en una opción más costosa que la monopolar. Sin embargo, las topologías bipolares pueden alcanzar el doble de potencia nominal que las topologías monopolares. Cada convertidor está conectado a la red AC a través de dos grupos de transformadores diferentes o mediante un transformador con dos devanados secundarios. La principal ventaja de la configuración bipolar es su redundancia, ya que estos pueden tener más de la mitad capacidad de transmisión, por lo tanto el sistema puede funcionar si uno de los convertidores falla.



#### 2.7.4. Conexión bipolar con retorno a tierra

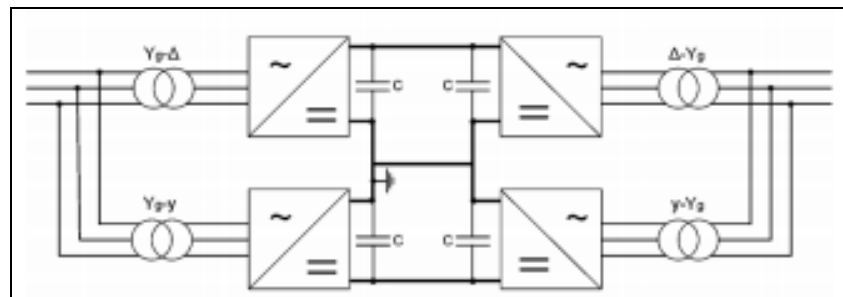
Las configuraciones bipolares tienen costos más elevados que las monopolar, además estos esquemas también presentan preocupaciones ambientales debido a que se deben instalar electrodos para el retorno de la corriente a tierra. Si no hay una ruta de retorno a tierra, el sistema HVDC no estará disponible ante una eventual falla [18].



**Figura 22.** Conexión bipolar con retorno a tierra [18].

#### 2.7.5. Conexión bipolar con retorno metálico

En comparación con la conexión bipolar con retorno a tierra, esta topología necesita un conductor neutro aislado de baja tensión. Si no es posible inyectar corriente en el suelo, existe la posibilidad de utilizar un retorno metálico completamente aislado y usarlo como respaldo en caso de avería, proporcionando una solución más flexible, aunque más costosa [18].

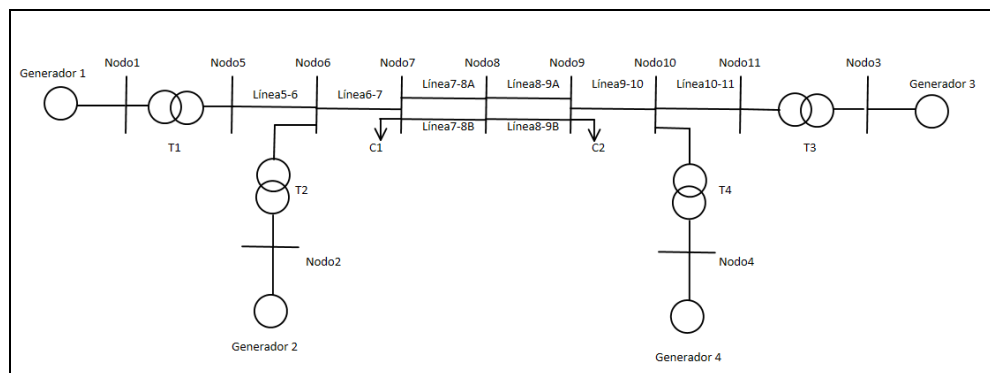


**Figura 23.** Conexión bipolar con retorno metálico [18].

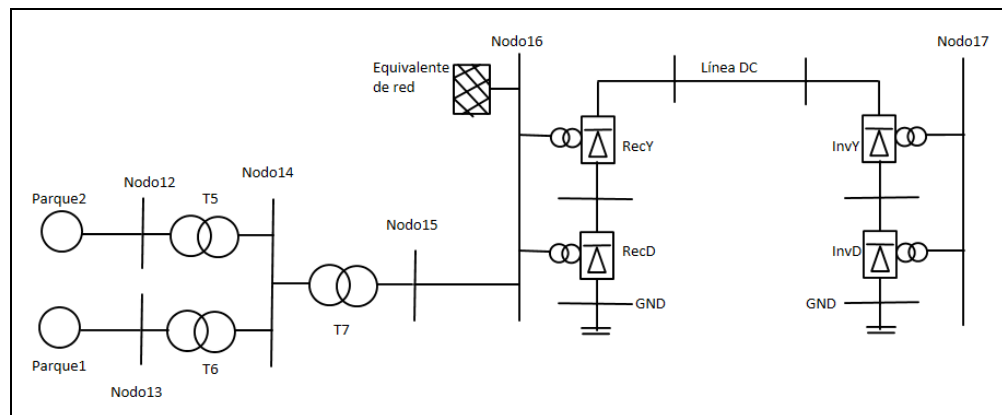
## CAPÍTULO III

### SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN HVDC

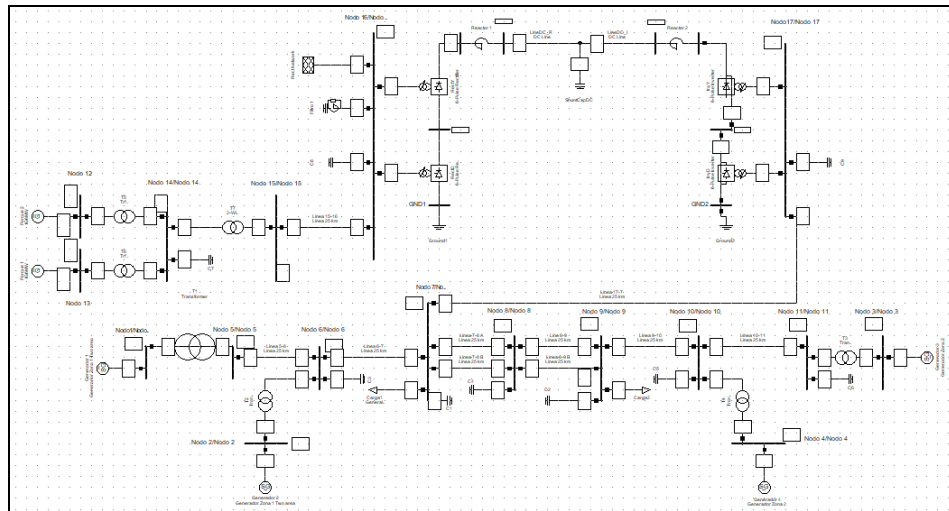
Se desea integrar un sistema HVDC a un sistema de potencia AC, para esta simulación se toma como base la configuración mostrada en la Figura 24, los valores que se usaron para cada componente del sistema de potencia fueron tomados de [10]. El modelado de todo el esquema se hizo utilizando el programa DigSILENT PowerFactory.



**Figura 24.** Diagrama unifilar del sistema AC.

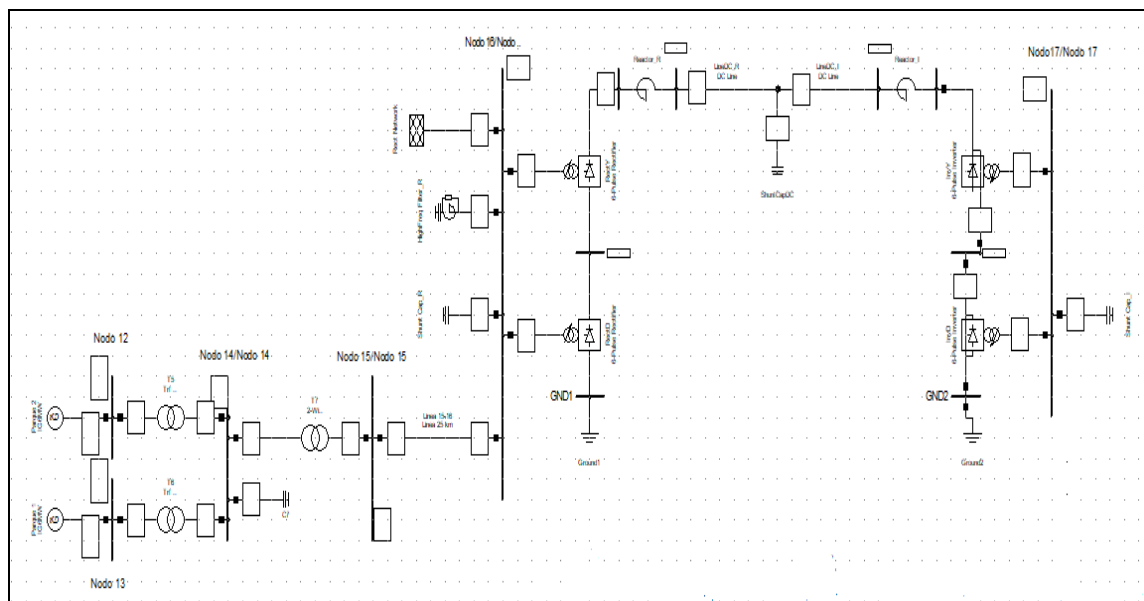


**Figura 25.** Sistema HVDC.



**Figura 26.** Diagrama unifilar del sistema completo en DigSILENT.

Al nodo 7 del sistema AC (ver Figura 24), mediante una línea de transmisión, se le conecta un sistema de transmisión HVDC (ver Figura 25), este sistema está compuesto de 50 generadores en paralelo, los cuales representan un parque eólico, que luego se conectan a una configuración de transmisión en corriente continua.



**Figura 27.** Sistema HVDC en DigSILENT.

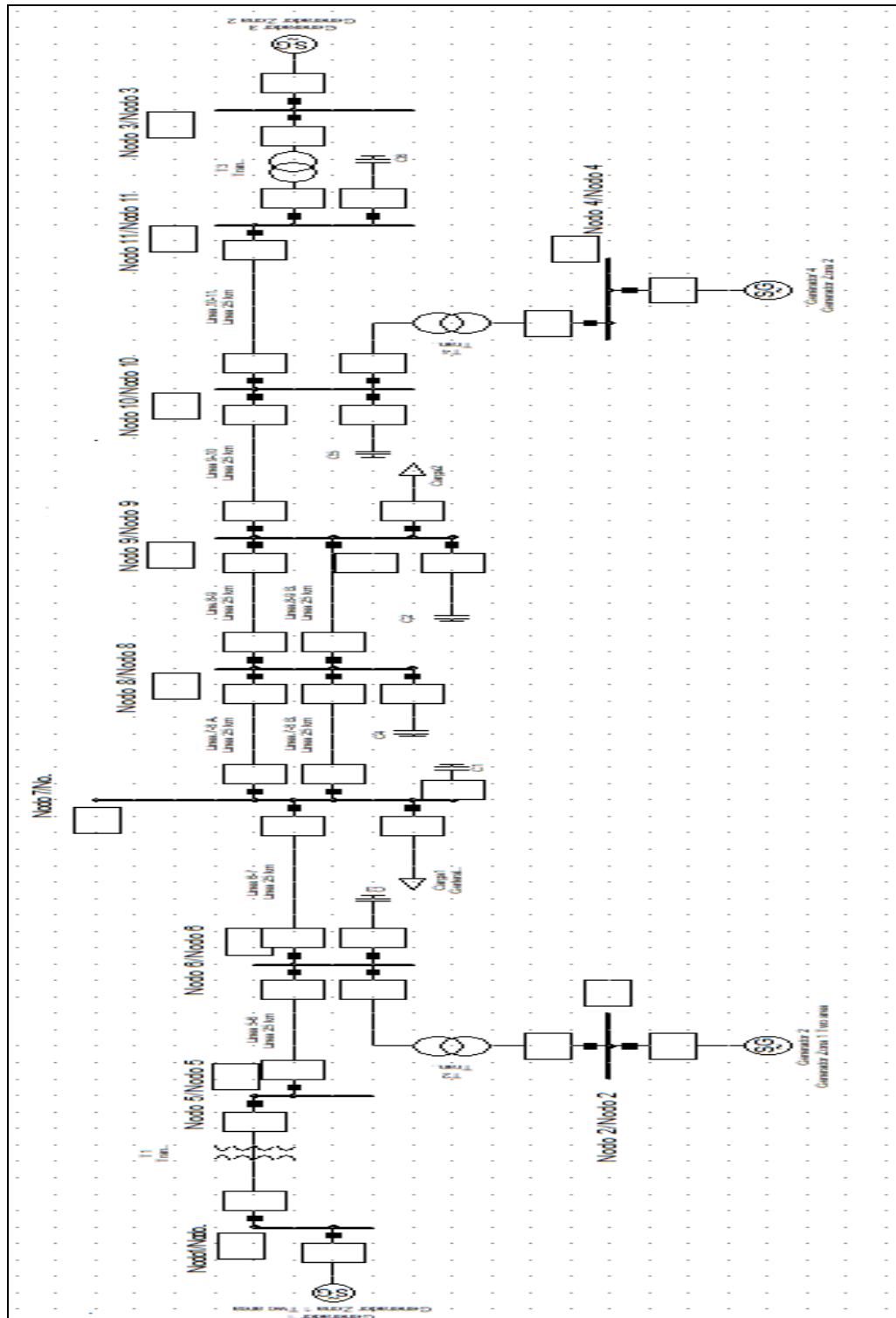


Figura 28. Sistema de potencia AC en DigSILENT.

Los valores de cada uno de los componentes del sistema HVDC se encuentran a continuación. Todos los nodos que están entre los convertidores tienen una tensión nominal de 250 kV.

Nodo	Tensión [kV]
12	0.69
13	0.69
14	20
15	345
16	345
17	230

**Tabla 1.** Nodos del sistema HVDC.

Transformador	Baja tensión [kV]	Alta tensión [kV]	Potencia [MVA]	X(1)	R(1)
T5	0.69	20	200	0.5	0.5
T6	0.69	20	200	0.5	0.5
T7	20	345	315	0.5	0.5

**Tabla 2.** Transformadores del sistema HVDC.

Línea	Longitud [km]	X(1) [ohm/km]	R(1) [ohm/km]	S(1) [uS/km]
15-16	25	0.529	0.0529	3.308
DC	500	0.1	0.01	0

**Tabla 3.** Líneas del sistema HVDC.

Firing Angle (alpha-)Control	
Control-Characteristic	I
Current Setpoint	0,85 kA
<input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control	
Actual Firing-Angle	15. deg
Minimum Firing Angle	10. deg
Maximum Firing Angle	180. deg
Minimum Extinction Angle	15. deg
Converter Transformer	
Tap-Changer	Fixed Tap
Actual Winding Ratio	1,01 p.u.
Commutation Reactance	13,4445 Ohm
Phase Shift	0. *30deg
Setpoint for DC Load Flow	
Power-Setpoint	25. MW

**Figura 29.** Valores nominales del rectificador Y.

El rectificador D tiene los mismos valores que el rectificador Y, sin embargo estos se diferencian en una cosa, esta es que el rectificador D tiene un control externo, mientras que el rectificador Y está controlado por corriente.

Firing Angle (alpha-)Control	
Control-Characteristic	Vdc
Voltage Setpoint	0,99 p.u.
<input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control	
Actual Firing-Angle	15. deg
Minimum Firing Angle	10. deg
Maximum Firing Angle	180. deg
Minimum Extinction Angle	10. deg
Converter Transformer	
Tap-Changer	Fixed Tap
Actual Winding Ratio	0,989 p.u.
Commutation Reactance	13,4445 Ohm
Phase Shift	0. *30deg
Setpoint for DC Load Flow	
Power-Setpoint	1. MW

**Figura 30.** Valores nominales de los inversores.

Los generadores Parque 1 y Parque 2 cuentan con las mismas características, internamente tienen 25 generadores en paralelo lo que nos da un total de 50 generadores, los cuales tienen una potencia nominal de 5 WM, una tensión de 0.69 kV.

Generador	Rs	Xs	Xm
Parque 1	0.01	0.1	3.5
Parque 2	0.01	0.1	3.5

**Tabla 4.** Impedancia del estator y reactancia de magnetización.

Filtros, capacitores y reactores	Potencia [MVAR]
C3	1
C4	30
C5	30
C6	60
C7	25
C8	1.249.668
C9	190
Filtr 1	2.522.342
Reactor 1	12
Reacto2	12
ShuntCapDC	2.042.035

**Tabla 5.** Filtros, capacitores y reactores.

## CAPÍTULO IV.

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el análisis, además de poder suplir la demanda del sistema, se desea que entre los nodos 7 y 9 fluya una potencia activa de 400 MW. Al correr el flujo de potencia si conectar el sistema DC se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 31.

Name	Type	Loading [%]	Busbar	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power.- factor [-]	Current [kA]	Current [p.u.]
Linea 7-8 A	Line	0,51	Nodo 7/Nodo 7	199,484	-8,347	1,00	0,513	0,005
			Nodo 8/Nodo 8	-194,900	35,760	-0,98	0,508	0,005
Linea 7-8 B	Line	0,51	Nodo 7/Nodo 7	199,484	-8,347	1,00	0,513	0,005
			Nodo 8/Nodo 8	-194,900	35,760	-0,98	0,508	0,005
Linea 8-9 A	Line	0,50	Nodo 8/Nodo 8	194,900	-21,359	0,99	0,502	0,005
			Nodo 9/Nodo 9	-190,531	46,259	-0,97	0,494	0,005
Linea 8-9 B	Line	0,50	Nodo 8/Nodo 8	194,900	-21,359	0,99	0,502	0,005
			Nodo 9/Nodo 9	-190,531	46,259	-0,97	0,494	0,005

**Figura 31.** Flujo de potencia del sistema AC.

Como se observa la suma de potencia activa de las líneas 7-8 A y 7-8B es 398.966 MW, mientras que la suma de potencia activa de las líneas 8-9 A y 8-9 B es 389.8 MW, evidentemente hubo pérdidas de potencia y no se llegó al valor de potencia deseado.

En la Figura 32 y en la Figura 33 se muestra el flujo de potencia cuando se integra el sistema HVDC, gracias a este se puede llegar al objetivo de 400 MW y permite que los generadores del sistema AC trabajen a un valor menor al de su capacidad máxima. Sin embargo, se siguen presentando pérdidas en las líneas comprendidas entre los nodos 7 y 8.



Name	Type	Loading [%]	Busbar	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power factor [-]	Current [kA]	Current [p.u.]
Linea 7-8 A	Line	0,50	Nodo 7/Nodo 7	200,025	-3,318	1,00	0,502	0,005
Linea 7-8 B	Line	0,50	Nodo 8/Nodo 8	-195,619	28,211	-0,99	0,498	0,005
Linea 8-9 A	Line	0,49	Nodo 7/Nodo 7	200,025	-3,318	1,00	0,502	0,005
Linea 8-9 B	Line	0,49	Nodo 8/Nodo 8	-195,619	28,211	-0,99	0,498	0,005
Linea 8-9 A	Line	0,49	Nodo 8/Nodo 8	195,619	-13,346	1,00	0,494	0,005
Linea 8-9 B	Line	0,49	Nodo 9/Nodo 9	-191,370	36,638	-0,98	0,488	0,005
Linea 8-9 B	Line	0,49	Nodo 8/Nodo 8	195,619	-13,346	1,00	0,494	0,005
Linea 8-9 B	Line	0,49	Nodo 9/Nodo 9	-191,370	36,638	-0,98	0,488	0,005
Linea 17-7	Line	1,13	Nodo17/Nodo 17	443,500	-51,842	0,99	1,128	0,011
Linea 17-7	Line	1,13	Nodo 7/Nodo 7	-443,483	70,269	-0,99	1,127	0,011

Figura 32. Flujo de potencia con sistema HVDC.

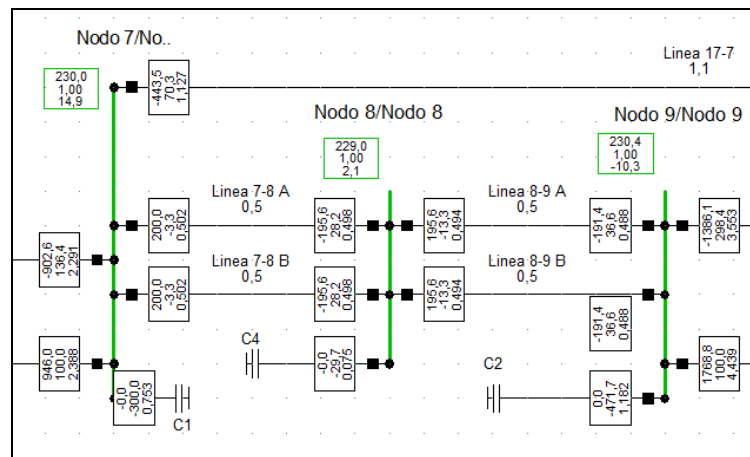


Figura 33. Flujo de potencia entre los nodos 7 y 9.

Como se ve en la Figura 32 y en la Figura 33, la potencia que llega del sistema HVDC al nodo 7 es de 443.483 MW, esta potencia se mantendrá constante incluso si se modifica la demanda. Como se mencionó anteriormente los sistemas HVDC que usan convertidores pueden controlar la potencia activa y reactiva que se le inyecta a la red, en este caso el rectificador Y es el que lleva este control y el parametro que lo controla es la corriente.

Si se desea entregar mas o menos potencia solo basta con modificar el valor de control de corriente del rectificador Y, esto representa una gran ventaja ya que permite transmitir energía de manera optima disminuyendo pérdidas.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIÓN**

La red eléctrica se encuentra en una transición energética, debido a que se desea depender cada vez menos de la generación de energía con combustibles fósiles, bajo esta premisa cobran relevancia las fuentes no convencionales de energía. Entre estas fuentes se encuentra la generación eólica. Para poder integrar la generación eólica a la matriz energética es indispensable conocer las formas en que se transmite la energía producida por un parque eólico. Una de las maneras más eficientes de transmitir esta energía es por medio de los sistemas HVDC, ya que permiten acoplar sistemas los cuales tienen distinta frecuencia. Los sistemas HVDC contienen convertidores de potencia, los cuales ofrecen una ventaja con respecto a los sistemas AC, ya que permiten controlar la potencia activa y reactiva que se entrega a la red, de esta manera se pueden reducir significativamente las pérdidas de energía. Aún con las limitantes que presenta generar con centrales eólicas, vale la pena seguir explorando los conceptos descritos anteriormente, ya que las integraciones de estos sistemas permiten entregar una energía más limpia y controlada, también permite llevar energía a zonas no interconectadas a la red eléctrica y de esta manera brindar una mejor calidad de vida a usuarios que se encuentren en zonas remotas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. S. Sáenz Robles, Modelos Agregados de Parques Eólicos. Sevilla, 2013.
- [2]. J. Gimenez Alvarez, "GENERACIÓN EÓLICA EMPLEANDO DISTINTOS TIPOS DE GENERADORES CONSIDERANDO SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE POTENCIA", 2011. Available:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a11v78n169.pdf>.
- [3]. Z. Chen, JM Guerrero y F. Blaabjerg, "Una revisión del estado del arte de la electrónica de potencia para turbinas eólicas", en *IEEE Transactions on Power Electronics* , vol. 24, no. 8, págs. 1859-1875, agosto de 2009, doi: 10.1109 / TPEL.2009.2017082.
- [4]. Comisión Nacional de Energía, Chile, "Guía para evaluación ambiental, energías renovables no convencionales, proyectos eólicos", *Energia.gob.cl*, 2006. [Online]. Available: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia\\_eolica.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia_eolica.pdf).
- [5]. "Distribución óptima de un parque eólico", *Jmirez.files.wordpress.com*, 2020. [Online]. Available:  
[https://jmirez.files.wordpress.com/2011/07/optima\\_distribucion\\_parque\\_eolico.jpg](https://jmirez.files.wordpress.com/2011/07/optima_distribucion_parque_eolico.jpg).
- [6]. "La huella de carbono de las energías renovables. 2- Eólica – ambientologosfera", *Ambientologosfera.es*, 2020. [Online]. Available:  
<https://www.ambientologosfera.es/2016/04/11/la-huella-de-carbono-de-las-energias-renovables-2-eolica/>.
- [7]. K. Tawfiq, A. Mansour, H. Ramadan, M. Becherif and E. El-kholy, "Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review", *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 38-47, 2019. Available: 10.1016/j.egypro.2019.04.005.
- [8]. O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Grid connected quasi-Z-Source direct matrix converter," *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, 2013, pp. 798-803, doi: 10.1109/IECON.2013.6699236.
- [9]. O. Abdel-Rahim, H. Funato, H. Abu-Rub and O. Ellabban, "Multiphase Wind Energy generation with direct matrix converter," *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Busan, 2014, pp. 519-523, doi: 10.1109/ICIT.2014.6894994.

- [10]. O. Abdel-Rahim, H. Funato, H. Abu-Rub and O. Ellabban, "Multiphase Wind Energy generation with direct matrix converter," *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Busan, 2014, pp. 519-523, doi: 10.1109/ICIT.2014.6894994.
- [11]. Alcalá, S. Charre, M. Durán and J. Gudiño, "Análisis del Convertidor CA/CD/CA (Back to Back) para la Gestión del Flujo de Potencia", *Información tecnológica*, vol. 25, no. 6, pp. 109-116, 2014. Available: 10.4067/s0718-07642014000600014.
- [12]. J. Esch, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 5, pp. 736-739, May 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2418461.
- [13]. P. Bordignon, "VSC Conversion Technology for HVDC & FACTS, State of the Art and Future Trend," *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Genova, Italy, 2019, pp. 1-1, doi: 10.23919/EPE.2019.8914977.
- [14]. A. Rolán, Á. Luna, G. Vásquez and D. Aguilar, "Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", 2009.
- [15]. V. F. Lescale, "Modern HVDC: state of the art and development trends," *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151)*, Beijing, China, 1998, pp. 446-450 vol.1, doi: 10.1109/ICPST.1998.729003.
- [16]. M. P. Bahrman, "OVERVIEW OF HVDC TRANSMISSION," *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, GA, 2006, pp. 18-23, doi: 10.1109/PSCE.2006.296221.
- [17]. M. Bahrman and B. Johnson, "The ABCs of HVDC transmission technologies", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 32-44, 2007. Available: 10.1109/mpae.2007.329194.
- [18]. E. Kontos, R. T. Pinto, S. Rodrigues and P. Bauer, "Impact of HVDC Transmission System Topology on Multiterminal DC Network Faults," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 844-852, April 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357056.