

“CONVERTIDORES DE POTENCIA CC/CA MULTINIVEL PARA SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA”



PROYECTO FIN DE CARRERA

ESCUELA
SUPERIOR
DE
INGENIEROS DE
SEVILLA



MEMORIA JUSTIFICATIVA

Autor:
JOSÉ de la CRUZ TORRES
INGENIERO EN ELECTRÓNICA



ÍNDICE

<u>ÍNDICE</u>	2
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	4
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	4
<u>ÍNDICE DE ECUACIONES</u>	5
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	6
<u>2. ESTADO DEL ARTE</u>	9
<u>2.1 EVOLUCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES</u>	9
<u>2.1.1 Energía eólica</u>	11
<u>2.1.2 Resto de energías alternativas</u>	13
<u>2.2 LA ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA</u>	27
<u>2.3 FUTURO DE LA ENERGÍA EÓLICA.</u>	31
<u>2.4 CONCLUSIONES</u>	35
<u>3. TIPOS Y USOS DE CONVERTIDORES CC/CA ACTUALES</u> ...	36
<u>3.1 TOPOLOGÍA DE LOS CONVERTIDORES CC/CA DE DOS NIVELES</u>	38
<u>3.1.1 Inversor puente completo monofásico</u>	38
<u>3.1.2 Inversor puente trifásico</u>	42
<u>3.2 PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTITUTIVOS</u>	44
<u>3.2.1. Interruptores de potencia</u>	44
<u>3.2.2. Diodos</u>	44
<u>3.3 TÉCNICAS DE CONTROL ACTUALES DE CONVERTIDORES DE DOS NIVELES</u>	45
<u>3.3.1 Modulación PWM Senoidal</u>	46
<u>3.3.2 Modulación Bang-Bang</u>	51
<u>4. CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL</u>	53

<u>4.1 INTRODUCCIÓN Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL</u>	53
<u>4.2 FUTURO DE LOS CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL PARA SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA</u>	56
<u>4.3 JUSTIFICACIÓN DEL ACTUAL PROYECTO</u>	57
<u>5. NORMATIVAS. CALIDAD DE ONDA</u>	58
<u>5.1 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA LA CONEXIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA</u> ...	59
<u>5.1.1 Control de huecos de tensión</u>	60
<u>5.1.2 Filtrado de Armónicos</u>	62
<u>5.1.3 Control de la reactiva generada</u>	64

ÍNDICE DE FIGURAS

- Ilustración 1. Principio de funcionamiento de una pila de combustible alimentada con hidrógeno y oxígeno.
- Ilustración 2. Esquema general de una planta basada en una pila de combustible
- Ilustración 3. Evolución de la potencia eólica en España
- Ilustración 4. Potencia eólica instalada por países
- Ilustración 5. Número de empresas de EERR por áreas en España
- Ilustración 6. Objetivos de incremento para 2010
- Ilustración 7. Esquema de clasificación de convertidores
- Ilustración 8. Inversor monofásico en puente completo
- Ilustración 9. Transiciones válidas entre dos estados de conmutación.
- Ilustración 10. Inversor de dos niveles trifásico de puente completo
- Ilustración 11. Transiciones válidas entre dos estados de conmutación.
- Ilustración 12. Transistor (a) IGBT y (b) GTO con su diodo en antiparalelo.
- Ilustración 13. Formas de onda en una rama de un puente inversor
- Ilustración 14. Modulación PWM senoidal
- Ilustración 15. Amplitudes de armónicos
- Ilustración 16. Tensión de salida normalizada en función de ma
- Ilustración 17. Control Bang-Bang de un inversor
- Ilustración 18. Modulación Bang-Bang
- Ilustración 19. Inversor de (a) 2 niveles, (b) 3 niveles, (c) m niveles.
- Ilustración 20. Número de niveles y su distorsión armónica
- Ilustración 21. Comportamiento durante cortocircuitos

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Reacciones químicas
- Tabla 2. Potencia eólica instalada por comunidades hasta 2005
- Tabla 3. PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2005-2010
- Tabla 4. Perspectivas futuras de potencia eólica instalada en España
- Tabla 5. Perspectivas futuras de potencia eólica instalada por comunidades
- Tabla 6. Estados de conmutación de un inversor monofásico de 2 niveles



Tabla 7. Estados de conmutación de un inversor trifásico de 2 niveles.

Tabla 8. Principales características de los semiconductores de potencia.

Tabla 9. Nivel de tensión-potencia máxima

Tabla 10. Bonificación aplicable a instalaciones conectadas a la Red de Distribución por su contribución al control de tensión.

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Modulación de amplitud

Ecuación 2. Modulación de frecuencia

Ecuación 3. Componente armónica fundamental

El presente trabajo se ha realizado como proyecto fin de carrera motivado por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. La memoria justificativa pretende realizar un análisis de los principales motivos que promueven la investigación en inversores multinivel en el mundo de los aerogeneradores para las energías renovables.

Para ello, se ha realizado una amplia investigación de todos los motivos que hacen que las energías renovables sean, a día de hoy, un futuro energético prometedor, resaltando la evolución de la energía eólica y toda la electrónica que envuelve a este tipo de captura de energía.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad. A lo largo del siglo XX la temperatura media global se ha incrementado en 0,6 °C. Europa se está calentando un 40% más rápido que el resto de los países del mundo juntos: la temperatura media en Europa ha subido un 0,95 °C. La principal causa del calentamiento global es la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, en especial el dióxido de carbono (CO₂), el CO₂ es el responsable de más del 80% del total de gases de efecto invernadero.

Tormentas, inundaciones, olas de calor, sequías,... Los impactos del cambio climático están azotando Europa cada vez con más fuerza y con mucha más frecuencia. El número medio de desastres relacionados con el clima en Europa se ha multiplicado por dos durante los años noventa, si los comparamos con la década anterior. A lo largo de los últimos años, la cantidad de inundaciones importantes de Europa se ha incrementado de una a 15 al año. Así, las tormentas que azotaron Europa en 1999 y las inundaciones de 2002 costaron, cada una, 13 mil millones de euros.

Los pasados veranos en Europa han sido los más calurosos de los últimos 500 años. El calor y la sequía afectan a la agricultura, la navegación interior y la producción de electricidad. Enormes zonas de bosques que cubrían un total del 5% de la superficie de Portugal han sido destruidas, suponiendo pérdidas de mil millones de euros. Por ejemplo, la ola de calor del 2003 causó pérdidas estimadas en 10 mil millones de euros. Y lo más importante, todo esto supuso, además, la muerte de unas 40.000 personas. Las causas comunes de muerte incluyeron enfermedades respiratorias y



cardiovasculares, así como golpes de calor y deshidratación. Otros problemas de salud relacionados con el cambio climático incluyen un aumento de las enfermedades transmitidas por insectos, incremento de los índices de cáncer de piel y alimentos contaminados y problemas de salud relacionados con las inundaciones.

Respecto a los datos del último año (2006), el Ministerio de Medio ambiente refleja una subida de más de 1º C de temperatura en España.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), el cambio climático también está cambiando el medio natural de Europa. Ocho de cada nueve glaciares de Europa están retrocediendo. La reducción de los glaciares de los Alpes Europeos está alcanzando niveles no registrados en los últimos 5.000 años. En 2050, el 75% de los glaciares de los Alpes Suizos habrán desaparecido. La capa de nieve anual del Hemisferio norte ha disminuido un 10% desde 1966. Entre 1978 y 2006, el hielo del mar Ártico se ha derretido en más del 7%. El espesor del hielo del mar Ártico, entre los periodos de 1958 a 1976 y 1993 a 1997, se ha derretido una media del 40%.

Los estados miembros de la UE se han comprometido reducir un 8% los niveles de emisión de gases de efecto invernadero entre el 2008 y el 2012 bajo el Protocolo de



Frimmersdorf, Alemania, la segunda central de carbón más sucia de Europa
□WWF Alemania/Andrew KERR

Kyoto. De acuerdo con las proyecciones de la EEA, los países de la UE disminuirán sus emisiones de gases de efecto invernadero sólo un 7,7% por debajo de los niveles de 1990 hasta el 2010, basado en las políticas y medidas domésticas existentes que ya se están implementando, y políticas y medidas adicionales actualmente planeadas.

El objetivo de reducir un 8% sólo se podrá alcanzar si los estados miembros planean y ponen en marcha medidas adicionales, o si diversos países disminuyen las emisiones en niveles superiores a lo acordado. Esto se debe al hecho de que algunos países están muy lejos de alcanzar sus objetivos nacionales de reducción.

El sector que más contribuye con las emisiones humanas de CO₂ es el de la energía. Ese sector produce el 37% de las emisiones globales de CO₂ y el 39% de Europa. La mayor parte de las emisiones del sector eléctrico de la UE proviene del carbón (72%), seguido por el gas (18%) y petróleo (10%). El carbón es el combustible fósil más rico



en carbono y quemarlo genera un 70% más CO₂ por unidad de energía producida que el gas natural. Las siete mayores empresas eléctricas de Europa han sido responsables del 75% de la generación de energía en Europa.

De los 21 mayores emisores de CO₂ del sector eléctrico europeo, siete han sido responsables del 70% de las emisiones. En orden decreciente, son: RWE, Enel, Vattenfall, E.ON, Endesa, EDF, y Electrabel. Según PwC, RWE, el mayor emisor, ha emitido dos tercios más que Enel, el segundo mayor emisor (datos de 2005).

Los próximos 20 años ofrecen una oportunidad histórica para que Europa reduzca drásticamente el nivel de las emisiones en el sector de la energía. A lo largo de este periodo, la mayoría de las centrales de carbón más sucias serán cerradas. Si son sustituidas por nuevas centrales de carbón, el continente seguirá encerrado en altos niveles de contaminación por CO₂ durante muchas décadas. Sin embargo, si las actuales centrales de carbón son sustituidas por alternativas limpias, Europa podría liderar el mundo hacia una economía baja en carbón y la Tierra podría evitar los peligrosos impactos de un cambio climático brusco.

A la vanguardia de investigación, la ecuación es sencilla, de aquí a veinte años, la demanda mundial de energía se duplicará probablemente para responder, en particular, a las necesidades imperativas de los países en desarrollo. Si persiste el patrón actual de consumo masivo de energías fósiles (petróleo y carbón), se llegará a una situación sin salida por dos motivos: el agotamiento de los recursos al cabo de un tiempo y el ya crítico calentamiento planetario debido a los gases de efecto invernadero. A ello, se añaden en todas las regiones densamente pobladas los graves daños para la salud que entraña la contaminación atmosférica.

Ha llegado, pues, la hora de movilizar las fuentes de energía inagotables y no-contaminantes que nos ofrece el ecosistema terrestre. Estas energías sostenibles, generadas por el viento, el sol, el agua, el mundo vegetal y los dos elementos químicos - hidrógeno y oxígeno - , ya constituyen en la actualidad un pilar importante de la política energética de la Unión. Ésta se ha comprometido a duplicar de aquí a diez años la proporción, todavía modesta, de dichas energías, que del 6% pasaría a constituir el 12% de su abastecimiento. Este incremento contribuirá de forma significativa a reducir la excesiva dependencia de Europa de las importaciones de hidrocarburos, cuya repercusión ha quedado patente tras el aumento drástico del precio del barril de petróleo. Este objetivo se integra en el contexto de liberalización del



sector de la energía y se apoya en una importante labor de investigación científica y tecnológica para superar los obstáculos que aún frenan el desarrollo de este potencial.

Dentro de España y con respecto a la reforma del mercado eléctrico, hay que destacar: las implicaciones de los cambios que se han producido con la creación del Mercado Ibérico de la Electricidad (MIBEL); el tratamiento de los CTCs; la repercusión del mercado de derechos de emisiones; y los mecanismos de apoyo de las energías renovables.

2. Estado del arte



El control de la energía, estrechamente ligado al destino del ser humano a través de toda su historia, se encuentra ahora ante un triple desafío: el imperativo de satisfacer las necesidades de los países en desarrollo, el agotamiento tarde o temprano de los recursos fósiles y la amenaza del calentamiento planetario debido al consumo masivo de dichos recursos.

2.1 Evolución de las energías renovables

Las energías renovables empezaron a desarrollarse cuando las crisis del petróleo de los años 70 nos hicieron tomar conciencia de que algún día los recursos fósiles se agotarían, si bien, al no saberse con certeza cuándo ocurriría, los intentos en esa dirección fueron tibios.

Desde entonces, la cuestión de la energía ha ido adquiriendo una dimensión cada vez más amplia. Se hizo patente que el empleo del carbón y el petróleo no se ajustaba al nuevo requisito de desarrollo sostenible. La comprobación de sus efectos negativos cobró precisión, en concreto, por lo que respecta a la calidad del aire, con sus repercusiones para la salud pública. Por último, la búsqueda de nuevas soluciones se intensificó cuando se descubrió que el consumo masivo de energías fósiles, principalmente en los países ricos, provoca el calentamiento del planeta. Esta amenaza dio lugar a la firma de los acuerdos de **Kyoto** (1998), en virtud de los cuales Europa se comprometió a reducir, desde esa fecha a 2008-2012, en un 8% sus emisiones de dióxido de carbono CO₂ respecto al nivel de 1990.



En el ámbito de las energías renovables, las tecnologías, tan variadas como las fuentes, han evolucionado sobremanera. La competencia de que dispone hoy Europa



se encuentra entre las mejores del mundo, y ello se debe a la intensa labor de investigación llevada a cabo en colaboración con la industria. Entre 1990 y 1998, el presupuesto comunitario dedicó casi 800 millones de euros a la financiación de proyectos de cooperación tecnológica transfronteriza relacionados con las energías renovables.

Se han realizado progresos en el ámbito de la eficacia de los equipos de producción y explotación en términos de potencia instalada, coste del kilovatio-hora, aplicaciones para usos concretos, soluciones para el almacenamiento, etc. Los equipos son cada vez más funcionales y las tecnologías no dejan de avanzar. *Uno de los desafíos a que han de enfrentarse los investigadores consiste en aumentar la eficacia de los instrumentos de explotación de los diversos recursos renovables (turbinas, sensores, sistema de autorregulación, medios de almacenamiento, soluciones para los aspectos nocivos,...).*

Al margen de las innovaciones técnicas, la financiación europea se ha dedicado a la ejecución de proyectos de demostración, de especial importancia para la expansión de este sector. Para imponerse en el mercado, donde han sido ignoradas durante mucho tiempo, las energías renovables han de "demostrar lo que valen" en instalaciones piloto con el fin de convencer a los posibles usuarios. En efecto, es ahí donde puede comprobarse su capacidad de funcionamiento y su interés económico, en aplicaciones bien focalizadas.

La integración de las energías renovables en todos los niveles posibles del consumo en Europa, en las zonas urbanas y las regiones periféricas, en la vivienda, la industria o los servicios constituye hoy una prioridad de los programas europeos. Europa sigue un enfoque centrado en la dimensión económica de la investigación y las demostraciones que la acompañan. Y este aspecto es decisivo si queremos seguir abriendo y dinamizando este mercado en el que ya interviene una cantidad importante de PYME, con un elevado potencial de creación de empleo.

2.1.1 Energía eólica

La energía eólica es una variante de la energía solar, pues se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera y de las irregularidades de relieve de la superficie terrestre. Sólo una pequeña fracción de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinética del viento y sin embargo ésta alcanza cifras enormes, superiores en varias veces a todas las necesidades actuales de electricidad. La energía eólica podría proporcionar cinco veces más electricidad que el total consumido en todo el mundo, sin afectar a las zonas con mayor valor ambiental.

Las virtudes de esta energía del viento se pueden resumir en:

- Es una fuente de energía segura y renovable.
- No produce emisiones a la atmósfera, ni genera residuos, salvo los de la fabricación de los equipos y el aceite de los engranajes.
- Se trata de instalaciones móviles, su desmantelación permite recuperar totalmente la zona.
- Beneficio económico por el hecho de aprovechar un recurso autóctono.
- Su instalación es compatible con otros muchos usos del suelo, y no lo degrada.
- Se crean puestos de trabajo.

La potencia que se puede obtener con un generador eólico es proporcional al cubo de la velocidad del viento; al duplicarse la velocidad del viento, la potencia se multiplica



por ocho, y de ahí que la velocidad media del viento sea un factor determinante a la hora de analizar la posible viabilidad de un sistema eólico. La energía eólica es un recurso muy variable, tanto en el tiempo como en el lugar, pudiendo cambiar mucho en distancias muy reducidas. En general, las zonas costeras y las cumbres de las montañas son las más favorables y mejor dotadas para el aprovechamiento del viento con fines energéticos.

La conversión de la energía del viento en electricidad se realiza por medio de aerogeneradores. Durante los últimos quince años la tecnología eólica ha experimentado un considerable progreso: se ha evolucionado desde máquinas de potencia unitaria de decenas de kilowatios, simples y frecuentemente de muy poca



fiabilidad, a aerogeneradores de potencia nominal en torno a los 650 kW y con diámetro de rotor del orden de 45 metros. La situación de la tecnología eólica en España, referida a máquinas comerciales de media potencia, entre 100 y 1.000 kW, ocupa un lugar destacado dentro de la Unión Europea, máxima contribuidora del aprovechamiento de los recursos eólicos en el mundo. Los desarrollos europeos de aerogeneradores de alta potencia ($> 1\text{ MW}$) están llevando a la producción en serie y a la comercialización de este tipo de máquinas, en el rango de potencias unitarias de 1 – 1,5 MW. Actualmente, se manejan tamaños de pruebas que abarcan hasta 5.000 kilovatios (5 MW). Los aerogeneradores se han desarrollado intensamente desde la crisis del petróleo en 1973, habiéndose construido desde entonces más de 150.000 máquinas.

Ya es competitiva la producción de electricidad en los lugares donde la velocidad media del viento supera los 4 metros por segundo. Se espera que dentro de unos pocos años también las máquinas grandes instaladas en el mar lleguen a ser rentables. La energía eólica no contamina y su impacto ambiental es muy pequeño comparado con otras fuentes energéticas. De ahí, la necesidad de acelerar su implantación en todas las localizaciones favorables, aunque procurando reducir las posibles repercusiones negativas, especialmente en las aves y en el paisaje, en algunas lugares. La costa de Almería y el Estrecho de Gibraltar son de las zonas españolas con mayor potencial, ya que allí se generan velocidades de hasta 8,5 m/s, superiores a los considerados aptos para obtener un buen rendimiento económico

El aprovechamiento del viento como recurso energético presenta inconvenientes, ya que la energía eólica produce ciertas alteraciones en el medio físico y socioeconómico. Además, afectan a la avi-fauna (mortalidad de aves por colisión y electrocución), al paisaje, movimientos de tierras, con la consiguiente destrucción de la vegetación y hábitats de algunos animales e incluso aumento de los niveles sonoros. Por lo que es necesario hacer un estudio de impacto ambiental y corregir en lo posible estas perturbaciones. Esto requiere una serie de condiciones de emplazamiento y medioambientales que restringen de forma significativa la difusión de este sistema, aunque la innovación tecnológica hace que en la actualidad sea un modelo competitivo a escala internacional para la generación comercial de electricidad. Según un informe encargado por **Greenpeace**, la Asociación Europea de Energía Eólica y el Foro para la Energía y el Desarrollo, el 10 por ciento de la electricidad mundial podría ser eólica en el año 2020, así como crear 1.700.000 empleos y reducir las emisiones mundiales de CO₂ en más de 10.000 millones de toneladas.

La energía eólica destaca por los siguientes beneficios respecto a otras formas de producción energética tradicional:

- No existe minería, es decir no hay grandes movimientos de terreno, ni arrastre de sedimentos, ni alteración de cauces de agua, ni contaminación por partículas, ni acumulación de residuos radiactivos,...
- No hay metalurgia ni transformación del combustible, o lo que es igual, no hay grandes consumos de energía, ni residuos radiactivos, ni problemas de transporte, ni mareas negras, ni contaminación del aire en las refinerías, ni explosiones de gas, ni agentes químicos muy agresivos,...
- Tampoco hay combustión ni fisión de combustible, lo que equivale a no accidentes nucleares, no vertidos *controlados* de productos radiactivos, no emisiones a la atmósfera de CO₂ ni otros gases invernadero provocadores del cambio climático, contaminantes ácidos, gases tóxicos, polución térmica,...

De esta manera, al juzgar los impactos de un parque eólico ha de hacerse en comparación al de las fuentes energéticas que este viene a sustituir, y la misma exigencia de producir un mínimo impacto ambiental debería aplicarse tanto al parque eólico como a las centrales termoeléctricas o nucleoelectricas convencionales.

2.1.2 Resto de energías alternativas

- **Energía Solar**



El sol ha sido una constante fuente energética a través de la evolución de la humanidad y en las diferentes áreas de actividad que el hombre ha desarrollado, como la agrícola, urbana o industrial. Pero para conseguir un aprovechamiento completo ha sido necesario aplicar una serie de sistemas de captación, que se han ido desarrollando a medida que avanzaba la tecnología. Esta energía posee como ventajas su elevada calidad energética, su escaso impacto ecológico y su largo período de duración. Los inconvenientes se deben a que llega a la tierra de forma dispersa y además no se puede almacenar de forma directa. Según la forma de recogida de la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología, ni en su aplicación.

1. Energía solar térmica:

Se trata de recoger la energía del sol a través de paneles solares y convertirla en calor. El calor recogido en los colectores puede destinarse a satisfacer



numerosas necesidades. Por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para dar calefacción a hogares, hoteles, colegios o fábricas. También, se podrá conseguir refrigeración durante las épocas cálidas.



En agricultura, se pueden conseguir otro tipo de aplicaciones como invernaderos solares que favorecieran las mejoras de las cosechas en calidad y cantidad, los secaderos agrícolas que

consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

2. Energía solar fotovoltaica:

La energía del sol se recoge en paneles solares y se convierte en electricidad. Esta se basa en la aplicación del efecto fotovoltaico que se produce al incidir la luz sobre unos materiales semiconductores, generándose un flujo de electrones en el interior del material, y en condiciones adecuadas, una diferencia de potencial que puede ser aprovechada con múltiples aplicaciones como la de la electricidad, tanto doméstica como en servicios públicos. Es especialmente importante para aquellos lugares aislados, granjas o caseríos. También se puede aplicar en agricultura y ganadería, no solo en electrificación, sino también en sistemas de bombeo de aguas, de riego, depuración, etc. Las células solares se usan también en calculadoras, relojes o juguetes. En señalización y comunicaciones pueden desarrollar un papel muy importante, tanto en navegación aérea como marítima, así como en carreteras y ferrocarriles, en repetidores de radio y TV, telefonía móvil, satélites artificiales o en aplicaciones especiales como oxigenación de aguas y vehículos eléctricos.

La producción de electricidad a partir de células fotovoltaicas es aún seis veces más cara que la obtenida en centrales de carbón, pero hace tan sólo dos décadas era veinte veces más. En 1960 el coste de instalar un solo vatio de

células fotovoltaicas, excluyendo las baterías, transformadores y otros equipos auxiliares, ascendía a 2.000 dólares; en 1975 era ya sólo 30 dólares y en 2004 va de 2,62 dólares a 4,25, dependiendo de la cantidad y el tipo de instalación. Si en 1975 el Kwh. costaba más de 7 euros, el precio actual está entre 0,3 y 0,6 euros, lo que permite que el empleo de células fotovoltaicas para producir electricidad en lugares alejados de las redes de distribución ya compita con las alternativas existentes, como generadores eléctricos a partir del petróleo.

Hoy en día, en Estados Unidos, la producción de un Kwh. cuesta de 4 a 8 céntimos de dólar en una central de carbón, de 4 a 6 en los parques eólicos, de 5 a 10 en una de petróleo, de 12 a 15 en una central nuclear y de 25 a 40 céntimos utilizando células fotovoltaicas. En los próximos años se espera reducir el coste del Kwh. a 12 céntimos de euro antes de 2010 y a 4 céntimos para el año 2030. Claro que en los costes anteriores no se incluyen los resultados del deterioro causado al ambiente por las distintas maneras de producir la electricidad.

El sur de España dispone de más de 3.000 horas de sol al año. Pero a pesar de estar a la cabeza de Europa en la cantidad de radiación recibida, no rentabiliza ni el 10% de la fuente inagotable de recursos que supone la energía solar y se sitúa por detrás de países menos soleados como Alemania, Austria o Suiza. Este dato, unido a la enorme potencialidad que supone el uso de una energía limpia e inagotable como la solar, motivó al gobierno autonómico en 1997 a impulsar, a través de la Consejería de Empleo y Desarrollo Tecnológico, el programa **Prosol**, cuya finalidad es la promoción y la subvención de la utilización de este tipo de tecnología. En este tiempo, **Prosol** se ha convertido en referente de la Unión Europea en el uso de energía solar y en la instalación de paneles en hogares y empresas, lo que le ha otorgado recientemente uno de los siete premios europeos que concede la Dirección General de Energía y Transportes de la Unión Europea.

- **Energía geotérmica**

Las plantas geotérmicas aprovechan el calor generado por la tierra. A varios kilómetros de profundidad, en tierras volcánicas, los geólogos han encontrado cámaras magmáticas, con rocas a varios cientos de grados centígrados. Además, en algunos lugares se dan otras condiciones especiales como son capas rocosas porosas y capas rocosas impermeables que atrapan agua y vapor de agua a altas



temperaturas y presión y que impiden que estos salgan a la superficie. Si se combinan estas condiciones se produce un yacimiento geotérmico.

Una vez que se dispone de pozos de explotación se extrae el fluido geotérmico que consiste en una combinación de vapor, agua y otros materiales. Este se conduce hacia la planta geotérmica donde debe ser tratado. Primero pasa por un separador de donde sale el vapor y la salmuera y líquidos de condensación y arrastre, que es una combinación de agua y materiales. Esta última se envía a pozos de re-inyección para que no se agote el yacimiento geotérmico. El vapor continúa hacia las turbinas que con su rotación mueve un generador que produce energía eléctrica. Después de la turbina, el vapor es condensado y enfriado en torres y lagunas.

Una de las ventajas fundamentales de la energía geotérmica es que el flujo de producción de energía es constante a lo largo del año, ya que no depende de variaciones estacionales como lluvias, caudales de ríos, etc. Es un complemento ideal para las plantas hidroeléctricas.

El vapor producido por líquidos calientes naturales en sistemas geotérmicos es una alternativa al que se obtiene en plantas de energía por quemado de materia fósil, por fisión nuclear o por otros medios. Las perforaciones modernas en los sistemas geotérmicos alcanzan reservas de agua y de vapor, calentados por magma mucho más profundo, que se encuentran hasta los 3.000 metros bajo el nivel del mar. El vapor se purifica en la boca del pozo antes de ser transportado en tubos grandes y aislados hasta las turbinas. La energía térmica puede obtenerse también a partir de géiseres y de grietas. En algunas zonas de la Tierra, las rocas del subsuelo se encuentran a temperaturas elevadas. La energía almacenada en estas rocas se conoce como energía geotérmica. Para poder extraer esta energía es necesaria la presencia de yacimientos de agua cerca de estas zonas calientes. La explotación de esta fuente de energía se realiza perforando el suelo y extrayendo el agua caliente. Si su temperatura es suficientemente alta, el agua saldrá en forma de vapor y se podrá aprovechar para accionar una turbina.

Podemos encontrar básicamente tres tipos de campos geotérmicos dependiendo de la temperatura a la que sale el agua:

- La energía geotérmica de alta temperatura
- La energía geotérmica de temperaturas medias
- Campo geotérmico de baja temperatura



La energía geotérmica de alta temperatura existe en las zonas activas de la corteza. Su temperatura está comprendida entre 150 °C y 400 °C, se produce vapor en la



superficie que es enviado a las turbinas, genera electricidad. Se requieren varios parámetros para que exista un campo geotérmico: un techo compuesto de una cobertura de rocas impermeables; un depósito, o acuífero, de permeabilidad elevada, entre 300 y 2.000 metros de profundidad; rocas fracturadas que permitan una circulación convectiva de fluidos, y, por lo

tanto, la transferencia de calor de la fuente a la superficie; y una fuente de calor magmático, entre 3 y 10 kilómetros de profundidad a 500-600 °C. La explotación de un campo de estas características se hace por medio de perforaciones según técnicas casi idénticas a las de la extracción del petróleo.

La geotermia es una fuente de energía renovable ligada a volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas geológicamente recientes, es decir, con actividad en los últimos diez o veinte mil años en la corteza terrestre. "La actividad volcánica sirve como mecanismo de transporte de masa y energía desde las profundidades terrestres hasta la superficie. Se relaciona con dos tipos de recursos explotables por el ser humano: la energía geotérmica y algunos tipos de yacimientos minerales, que son depósitos de origen magmático e hidrotermal".

Las plantas geotérmicas, como las eólicas o solares, no queman combustibles para producir vapor que gire las turbinas. La generación de electricidad con energía geotérmica ayuda a conservar los combustibles fósiles no renovables, y con el menor uso de estos combustibles, reducimos las emisiones que ensucian nuestra atmósfera. Hay un aire sin humo alrededor de las plantas geotérmicas, de hecho algunas están construidas en medio de granjas de cereales o bosques, y comparten tierra con ganado y vida silvestre local. Los usos directos de las aguas geotérmicas van en un rango de 10 a 130°C y son utilizadas directamente de la tierra:

- Para uso sanitario.
- Balnearios.
- Para cultivos en invernaderos durante el periodo de nevadas.
- Para reducir el tiempo de crecimiento de pescados, crustáceos, etc.
- Para varios usos industriales como la pasteurización de la leche.

- Para la implantación de calefacción en distritos enteros y viviendas individuales.

La energía geotérmica es una alternativa ante el agotamiento de los recursos convencionales y un aporte importante para solucionar los problemas de energía, abriendo una posibilidad de un futuro mejor para todos.

- **Energía de origen vegetal: Biomasa**

La biomasa, ingente depósito de energía, engloba diversas materias primas orgánicas de origen vegetal: productos silvícola, determinados cultivos, residuos agrícolas, industriales o domésticos reciclados, etc. Constituye el cuarto recurso explotado a escala mundial (14% del consumo del planeta). Sin embargo, salvo en Austria, Finlandia y Suecia, donde ocupa un lugar nada despreciable, la biomasa sólo representa el 2% del balance general de Europa. Produce una energía almacenable y no fluctuante, además de encerrar numerosas ventajas. Respecto a la amenaza del efecto invernadero, la utilización de la biomasa resulta neutra, ya que los vegetales explotados para fines energéticos restituyen el carbono almacenado durante su crecimiento. La creación de una verdadera industria de la biomasa, potencialmente generadora de empleo, puede constituir una línea de evolución de la política agrícola común.

En la actualidad, el coste de la energía producida sigue siendo demasiado elevado en numerosas aplicaciones. Varios estudios europeos sobre tecnologías de conversión (procesos termoquímicos, químicos y biológicos) abren perspectivas de usos finales diversificados, como fuente de calor y electricidad o en forma de biocombustibles.

Existen una serie de factores que condicionan el consumo de biomasa en los países europeos y que hacen que este varíe de unos a otros, tanto cuantitativamente como en el aprovechamiento de la energía final. Estos factores se pueden dividir en tres grupos:

- **Factores geográficos:** Inciden directamente sobre las características climáticas del país condicionando, por tanto, las necesidades térmicas que se pueden cubrir con combustibles biomásicos.
- **Factores energéticos:** Dependiendo de los precios y características del mercado de la energía en cada momento, se ha de decidir si es o no rentable

el aprovechamiento de la biomasa como alternativa energética en sus diversas aplicaciones.

- **Disponibilidad del recurso:** Hace referencia a la posibilidad de acceso al recurso y la garantía de su existencia. Estos factores son los más importantes ya que inciden directamente tanto en el consumo energético de biomasa como en sus otras posibles aplicaciones.

La elaboración de biocarburantes a partir de productos agrícolas es también una alternativa a tener en cuenta, no sólo por la reducción de la contaminación atmosférica ocasionada por los vehículos a motor, sino también por contribuir a la diversificación de las actividades en el mundo rural. Según las previsiones de la Comisión Europea, se estima que en el año 2010 los biocarburantes podrían conseguir una participación del 3% en el consumo de energía del sector del transporte europeo

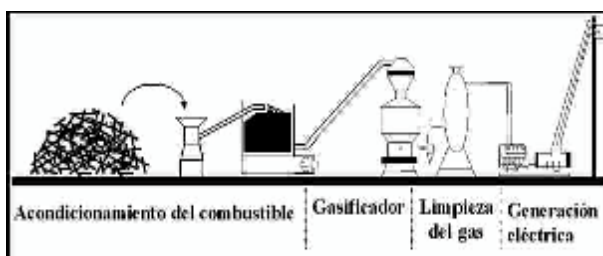
Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, una de las clasificaciones más generalmente aceptada es la siguiente:

- **Biomasa natural:** es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados en las podas naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa. La utilización de estos recursos requiere de la gestión de su adquisición y transporte hasta la empresa lo que puede provocar que su uso sea inviable económicamente.
- **Biomasa residual seca:** se incluyen en este grupo los subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, en las forestales y en los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera y que, por tanto, son considerados residuos. Este es el grupo que en la actualidad presenta un mayor interés desde el punto de vista del aprovechamiento industrial. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, el serrín, etc.
- **Biomasa residual húmeda:** son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).
- **Cultivos energéticos:** son cultivos realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Algunos ejemplos son el cardo (cynara

cardunculus), el girasol cuando se destina a la producción de biocarburantes, el miscanto, etc.

- **Biocarburantes:** aunque su origen se encuentra en la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (por ejemplo reciclado de aceites) como de la biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o en los cultivos energéticos (colza, girasol, patata, etc.), por sus especiales características y usos finales, este tipo de biomasa exige una clasificación distinta de las anteriores.

En España actualmente el potencial energético de los residuos asciende a 26 Mtep, para una cantidad que en toneladas físicas supera los 180 millones: 15 millones de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos con un potencial de 1,8 Mtep; 12 millones de toneladas de lodos de depuradoras; 14 millones de t de residuos industriales (2,5 Mtep); 17 Mt de residuos forestales (8,1 Mtep); 35 Mt de residuos agrícolas (12,1 Mtep); 30 Mt de mataderos; y 65 Mt de residuos ganaderos (1,3 Mtep). El reciclaje y la reutilización de los residuos permitirán mejorar el medio ambiente, ahorrando



importantes cantidades de energía y de materias primas, a la vez que se trata de suprimir la generación de residuos tóxicos y de reducir los envases. La incineración no es deseable, y probablemente tampoco

la producción de biocombustibles, dadas sus repercusiones sobre la diversidad biológica, los suelos y el ciclo hidrológico. A más largo plazo, el hidrógeno es una solución más sostenible que el etanol y el metanol.

El Plan de Fomento de las Energías Renovables en España prevé que la biomasa llegue a 10.295 ktep. Hoy apenas llegamos a 3.600 ktep (incluyendo los biocarburantes y el biogás), con un incremento ínfimo respecto a años anteriores. Y las perspectivas no son mucho mejores. Con las políticas actuales, en el año 2010 difícilmente se superará el 50% de los objetivos del Plan (poco más de 5 Mtep). Los restos de madera, como sostiene ANFTA (Asociación Nacional de Fabricantes de Tableros), son demasiado valiosos para ser quemados, pues constituyen la materia prima base de la industria del tablero aglomerado y sólo debe quemarse como aprovechamiento último, y España es muy deficitaria en restos de madera (se importan más de 350.000 m³), y en madera en general (se importa más del 50%). Además, el CO₂ se acumula en los tableros (cada metro cúbico de tablero aglomerado



fija 648 Kg. de CO₂), mientras que la quema lo libera, se genera más empleo en las zonas rurales, más valor añadido y se producen muebles de madera al alcance de todos.

- **Energía hidroeléctrica**

La energía hidroeléctrica se genera haciendo pasar una corriente de agua a través de una turbina. La electricidad generada por una caída de agua depende de la cantidad y de la velocidad del agua que pasa a través de la turbina, cuya eficiencia puede llegar al 90%. El aprovechamiento eléctrico del agua no produce un consumo físico de ésta, pero puede entrar en contradicción con otros usos agrícolas o de abastecimiento urbano y, sobre todo, las grandes centrales tienen un gran impacto ambiental.

Las centrales hidroeléctricas en sí mismas no son contaminantes; sin embargo, su construcción produce numerosas alteraciones del territorio y de la fauna y flora: dificulta la migración de peces; la navegación fluvial y el transporte de elementos nutritivos aguas abajo; provoca una disminución del caudal del río; modifica el nivel de las capas freáticas, la composición del agua embalsada y el microclima; y, origina el sumergimiento de tierras cultivables y el desplazamiento forzado de los habitantes de las zonas anegadas. En la mayoría de los casos, es la forma más barata de producir electricidad, aunque los costes ambientales no han sido seriamente considerados.

El potencial eléctrico aún sin aprovechar es enorme. Apenas se utiliza el 17% del potencial a nivel mundial, con una gran disparidad según los países. Europa ya utiliza el 60% de su potencial técnicamente aprovechable. Los países del tercer mundo solamente utilizan el 8% de su potencial hidráulico. En España, el potencial adicional técnicamente desarrollable podría duplicar la producción actual, alcanzando los 65 TWh anuales, aunque los costes ambientales y sociales serían desproporcionados.

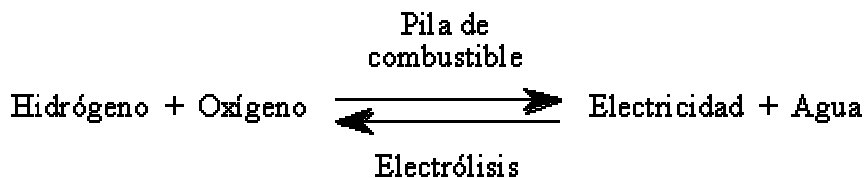


El mapa representa las centrales mayores de 20 MW. Se indica el nombre de las 10 centrales mayores de 300 MW.

Las minicentrales hidroeléctricas causan menos daños que los grandes proyectos, y podrían proporcionar electricidad a amplias zonas que carecen de ella. Una Pequeña Central es una instalación donde se utiliza energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad, desde 5 KW (Kilowatios) hasta 5.000 KW, por medio de uno o más conjuntos, o grupos turbina-generator. Las minicentrales tienen la ventaja de ser confiables, sencillas de operar, de mínimo mantenimiento y de fácil viabilidad técnica y de ingeniería. Pueden abastecer un mercado de características rurales y no tienen un alto impacto ambiental, además de ayudar a neutralizar los altos costos de transmisión de electricidad desde grandes centros de producción. Otro beneficio de las minicentrales es la conciencia conservacionista que inducen en las comunidades beneficiarias, y que se expresa en la protección de las cuencas y micro-cuencas que las surten de agua.

- **Pilas de combustible: Hidrógeno**

Una pila de combustible puede definirse como un dispositivo electroquímico que transforma directamente y, lo que es más importante, de forma continuada, la energía química almacenada por un combustible en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento es inverso al de una electrólisis. Por ejemplo, en la electrólisis del agua, se separa este compuesto en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno, mientras que en una pila de combustible se obtendría una corriente eléctrica por medio de la reacción entre estos dos gases:



Las pilas de combustible están constituidas por un conjunto de celdas apiladas, cada una de las cuales posee un ánodo o electrodo negativo y un cátodo o electrodo positivo, separados por un electrolito que facilita la transferencia iónica entre los electrodos (véase la Fig. 1). Cada una de las sustancias que participan en la reacción es alimentada a un electrodo distinto. Así, el combustible, generalmente rico en hidrógeno, es alimentado de forma continua al ánodo, y el oxidante, normalmente el oxígeno del aire, al cátodo. Allí los reactivos se transforman electroquímicamente, de acuerdo con las semi-reacciones:

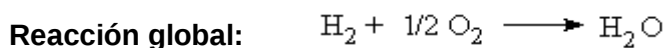
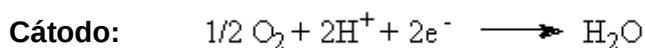
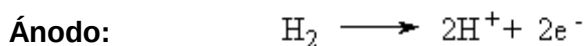


Tabla 1. Reacciones químicas de la pila de combustible.

Se genera de esta forma una corriente eléctrica entre ambos electrodos que, a diferencia de lo que ocurre en una pila o batería convencional, no se agota con el tiempo de funcionamiento, sino que se prolonga mientras continúe el suministro de los reactivos.

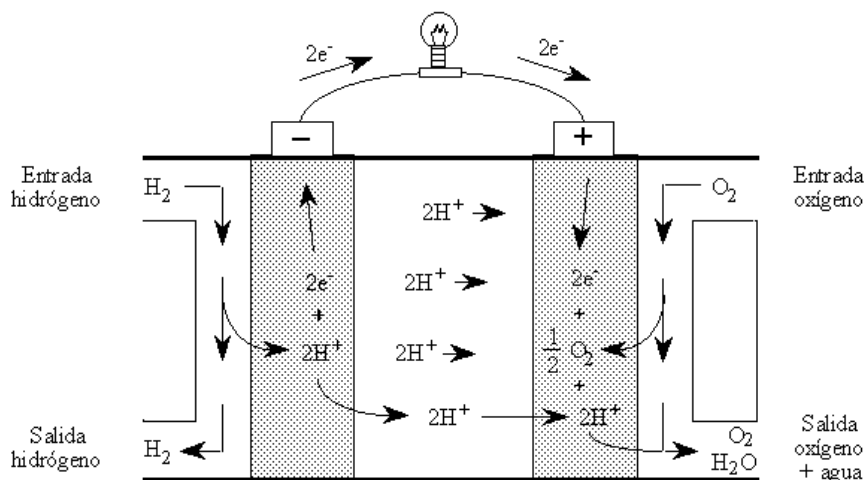


Ilustración 1. Principio de funcionamiento de una pila de combustible alimentada con hidrógeno y oxígeno.

La reacción global de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno es espontánea, pero adolece de una cierta lentitud cuando transcurre de forma separada en cada uno de los electrodos. Es por ello que sobre la superficie de los mismos se suelen incorporar catalizadores que aceleran la reacción.

Como se dijo anteriormente, la unidad fundamental, llamada también celda, no es suficiente para aplicaciones prácticas, uniéndose varias de ellas para conseguir la potencia y tensión adecuadas, formando de esta manera una pila de combustible. Las celdas están unidas eléctricamente en serie. En cada cierto número de celdas unitarias se inserta un dispositivo que permite extraer el calor generado por la reacción electroquímica, manteniendo de esta forma la temperatura dentro de los márgenes óptimos para cada tipo de celda. El calor, extraído a través del circuito interno de refrigeración, es recogido mediante una serie de intercambiadores que lo entregan a un circuito externo, produciéndose en la misma agua caliente o vapor, dependiendo de la temperatura de funcionamiento de la pila. La energía térmica, así obtenida, puede emplearse como tal, o bien utilizarse en la generación de una cantidad adicional de energía eléctrica, aumentando así el rendimiento del sistema.

La corriente continua proporcionada por la pila debe ser transformada en corriente alterna apta para el consumo, con una especial atención a los parámetros eléctricos (voltaje, frecuencia, armónicos, etc.) de la red. La parte eléctrica encargada de esta transformación recibe el nombre de sistema de acondicionamiento de energía, y su



componente más importante es el inversor, que transforma la corriente continua producida por la pila en corriente alterna.

Puesto que el único combustible admitido por las pilas de combustible es el **hidrógeno**, gas que no se encuentra libre en la naturaleza, se requiere una etapa química previa para su obtención a partir de sustancias orgánicas que lo contengan. Uno de los procesos adecuados para este fin es el reformado catalítico con vapor de agua, siendo su rendimiento tanto mayor cuanto más alta sea la relación hidrógeno/carbono de la materia prima empleada. El metano contenido en el gas natural es, entre los combustibles disponibles, el que posee una relación hidrógeno/carbono más elevada. Ello convierte a este combustible en el idóneo para el funcionamiento de estos equipos.

La utilización del hidrógeno como carburante presenta grandes ventajas, ya que es una fuente abundante, y tras su combustión solamente se produce calor y vapor de agua. Consecuentemente, estaríamos ante un sistema limpio y silencioso. En contrapartida, es un gas altamente inflamable con lo cual supondría que para su utilización habría que rediseñar los vehículos; además sería costosa la realización de infraestructuras para su distribución.

Con el objeto de hacer más versátil el funcionamiento de las pilas de combustible, se añaden una serie de equipos auxiliares, que no por ello son menos importantes: sistemas informáticos de gestión y control, condensadores de vapor, sistemas de suministro de gases, ventiladores, etc. Todas estas partes, junto con las descritas anteriormente, forman lo que se llama una planta basada en una pila de combustible o, sencillamente, una pila de combustible. El esquema general de una planta basada en una pila de combustible aparece representado en la Fig. 2.

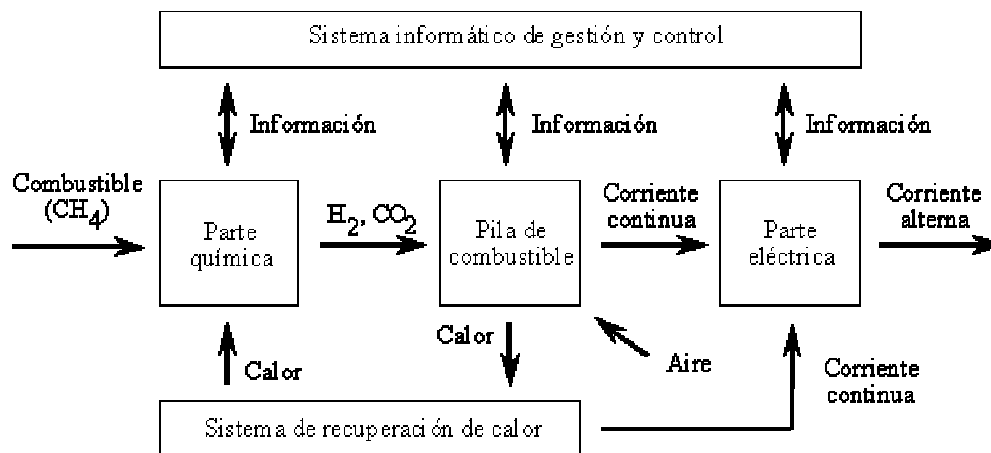
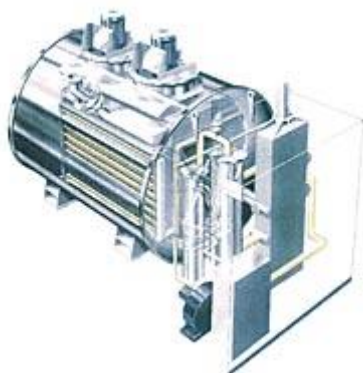


Ilustración 2. Esquema general de una planta basada en una pila de combustible

A modo de resumen de todo lo expuesto hasta ahora, podemos afirmar que una pila de combustible es un sistema electroquímico que, alimentado con combustible reformado (**Hidrógeno**), proporciona energía eléctrica y agua, como productos finales de una reacción que transcurre de forma separada en cada uno de los electrodos. Como subproducto, se obtiene energía térmica.

Las pilas de combustible pueden ofrecer la respuesta a diversos requerimientos energéticos. La eficacia de estos dispositivos no depende del tamaño como sucede en otros sistemas energéticos. Este hecho permite su aplicación en sistemas de energía miniaturizados y portátiles. Las aplicaciones de las pilas de combustible pueden abarcar una amplia variedad de productos: desde dispositivos portátiles (teléfonos móviles, ordenadores, pequeños electrodomésticos), donde las pilas empleadas son de pequeño tamaño, pasando por aplicaciones móviles como vehículos de todo tipo (coches, autobuses y barcos), hasta generadores de calor y energía en aplicaciones estacionarias para empresas, hospitales, zonas residenciales, etc. Su eficacia es potencialmente superior a cualquier otro sistema, haciéndolas particularmente atractivas para aplicaciones estáticas de alta o baja energía. Además, las celdas de combustible suponen actualmente una esperanza real dentro del mercado del transporte.



Las pilas del futuro. Además de poder llegar a ser una fuente de energía ecológica para los vehículos del futuro, la pila de combustible constituye asimismo una prometedora alternativa para aplicaciones a escala industrial. Un consorcio de empresas alemanas y danesa han logrado, en el marco de un proyecto europeo, un tipo nuevo de grupo electrógeno móvil, capaz de alimentar instalaciones tanto en electricidad como en calor.

En los últimos años han surgido diversas iniciativas para el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno. Con este fin, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha destinado más de 1.700 millones de euros para los próximos cinco años y la Unión Europea, dentro del **VI Programa Marco** (2003-2006), unos 275 millones de euros. En España, el **Plan Nacional de I+D+I 2004-2007** también incluye apartados específicos para el desarrollo de este tipo de tecnologías.

2.2 La energía eólica en España

El sector eólico español registró el mayor crecimiento del mundo durante el año 2004, un 38%, con 2.361 MW de nueva conexión a la Red en total, la potencia eólica en funcionamiento o en período de pruebas en España ascendió a unos 8.000 MW repartidos por los 430 parques eólicos del país. Durante 2005, el sector eólico español habrá superado los 9.000 MW de potencia instalada, situándose por encima de los 9.100 MW.

**Evolución acumulada de la potencia eólica instalada en España
entre 1990-2004 (en MW) - Fuente: APPA**

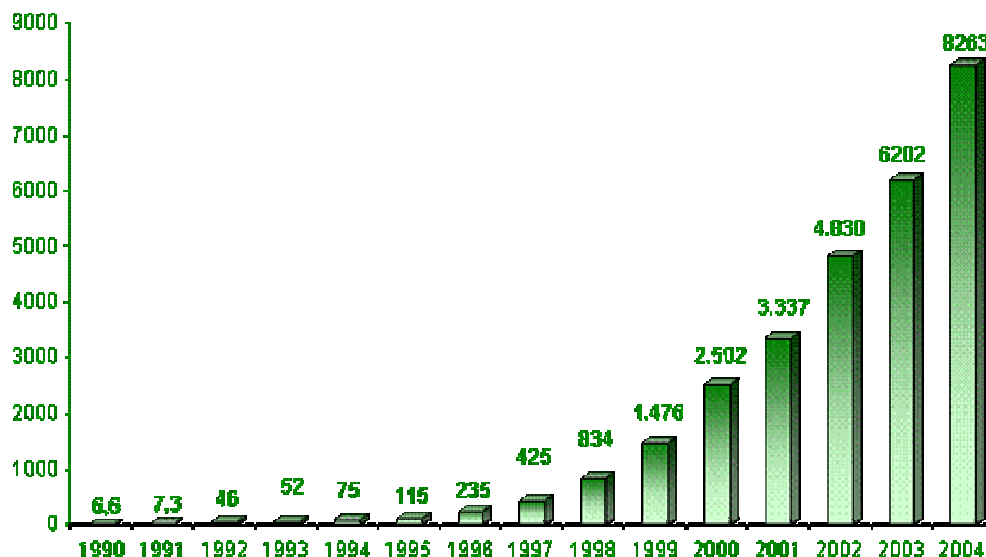


Ilustración 3. Evolución de la potencia eólica en España

Según estos datos por delante, la Plataforma Empresarial Eólica PEE aseguró que España fue el país que protagonizó **“el mayor crecimiento mundial”** en energía eólica a lo largo del año pasado, con lo que recuperó el segundo puesto en el mundo en potencia eólica instalada, sólo por detrás de Alemania y delante de EEUU.

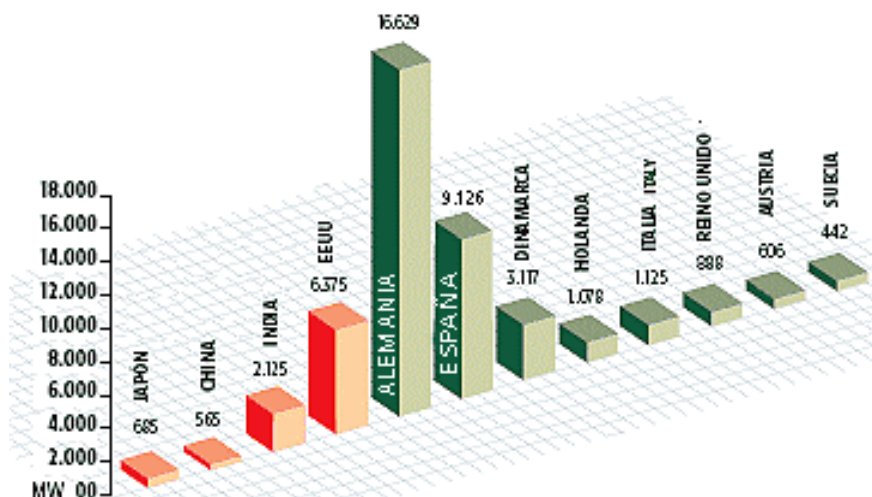


Ilustración 4. Potencia eólica instalada por países

Las cifras expuestas antes prevén un futuro prometedor para la energía eólica, principalmente porque el consumo ha sido creciente y se mantendrá así durante los próximos años. La energía eólica es una fuente poco contaminante y agresiva con el medio ambiente, el crecimiento anual ronda el 30%, la potencia media de los



aerogeneradores es cada vez mayor y disminuye el precio de cada MW instalado. Por comunidades autónomas, el mayor crecimiento lo ha registrado Castilla-La Mancha, con 731,5 MW nuevos, seguida por Castilla y León (576,9 MW), Galicia (511,5 MW), Aragón (178,3 MW) y Andalucía (127,6 MW). Extremadura, Cantabria y mencion aparte merecen las islas Baleares, que, con el parque eólico **Es Milà**, de 3 MW, comenzó a partir del 2004 a explotar la energía del viento vertiendo la electricidad a la Red.

Comunidad Autónoma	Situación Año 2004 (MW)
ANDALUCÍA	350
ARAGÓN	1.154
ASTURIAS	145
BALEARES	3
CANARIAS	139
CANTABRIA	-
CASTILLA Y LEÓN	1.543
CASTILLA - LA MANCHA	1.534
CATALUÑA	94
EXTREMADURA	-
GALICIA	1.830
MADRID	-
MURCIA	49
NAVARRA	854
LA RIOJA	356
COMUNIDAD VALENCIANA	21
PAÍS VASCO	85
TOTAL AÑO 2010	8.155 MW

Tabla 2. Potencia eólica instalada por comunidades hasta 2005

La distribución por promotores muestra cierta concentración de la potencia y un peso creciente de las compañías eólicas filiales de las empresas eléctricas.

En cuanto a los fabricantes, Gamesa ocupa el indiscutible primer puesto, ya que ha producido casi las dos terceras partes de todos los aerogeneradores instalados en España tras adquirir MADE, antigua filial de Endesa. Los siguientes en el escalafón son NEG Micon y Ecotècnia, actualmente integrada en la Corporación Mondragón. Respecto a los puestos de trabajo, el sector ya genera empleo para más de 30.000 personas, y es un elemento inductor en diversas empresas fabricantes y de servicios.

En el año 2010, en España llegaremos a unos 20.000 MW, y en el año 2040 podemos llegar sin problemas a 100.000 MW, produciendo gran parte de la electricidad que consumimos, y también hidrógeno, pero para ello se deben superar ciertas dificultades para integrar la eólica en la red eléctrica, y superar la oposición irracional a los nuevos



parques eólicos. Cada kWh eólico permitiría ahorrar un kilogramo de CO₂, entre otras sustancias contaminantes. La eólica es la manera más económica de reducir las emisiones contaminantes y avanzar hacia la sostenibilidad.



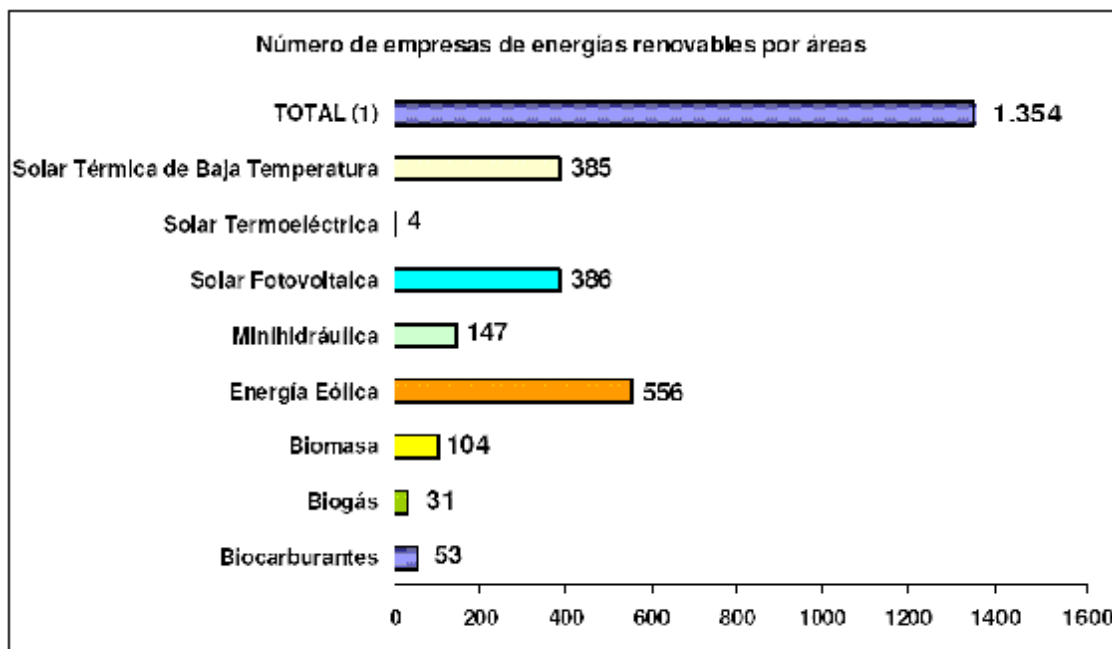
La energía eólica es la más desarrollada de todas las fuentes de energía renovable y la que mejor puede y debe contribuir a alcanzar el objetivo nacional de cubrir el 12% del consumo energético primario con ellas en 2011. Ese año, la generación eólica podría cubrir el 16% de la demanda eléctrica del país, para lo que se necesita tener instalados 23.000 MW, cifra no muy lejana de los 20.000 MW de 2010. El sector eólico español, por capacidad productiva, ritmo inversor y potencial energético disponible, está preparado para ello. Nos esperan desafíos importantes en los que trabajar para que la generación de electricidad a través de la energía eólica como fuente, sea uno de los pilares de generación energética e innovación en un país como España, comprometido con el desarrollo sostenible y con carencia de fuentes de energía propias, con la excepción de las energías renovables. Esta tarea, desde el sector y desde la Asociación Empresarial Eólica como su organismo de representación, lo asume como propio y como principal objetivo para este ejercicio que ahora empieza.

Otro gran aspecto, a tener en cuenta respecto a la evolución de la energía eólica en



España, es la creación de parques eólicos “**Offshore**”. En el desarrollo de la eólica española influirá decisivamente una modalidad no referida hasta ahora, la eólica marina. En este momento, las ubicaciones con más viento en España están ya ocupadas o autorizados otros nuevos mientras que el mar es una alternativa que puede dar muchas opciones en los próximos años ya que el potencial eólico marino en la Península Ibérica es de unos 25.000 MW. La principal ventaja es que

en el mar la velocidad del viento es mayor por existir apantallamiento por la tierra; el precio de una instalación eólica en el mar y del mantenimiento son superiores que en tierra, pero los parques *offshore* tienen una vida útil más larga y la producción de electricidad es un 20% mayor que en tierra, así la rentabilidad en el mar es superior que en tierra.



(1): El número total de empresas es inferior a la suma por áreas, pues hay empresas que figuran en más de un área.

Ilustración 5. Número de empresas de EERR por áreas en España

En España, no hay ningún parque eólico marino en funcionamiento actualmente, pero si hay varios funcionando en otros países del Norte de Europa, como Dinamarca, Suecia o Gran Bretaña.

Respecto al tejido industrial y, en un sentido más amplio, al conjunto de actividades económicas vinculadas con el desarrollo de las energías renovables, en España existe un gran número de empresas con cifras de negocio significativas. De acuerdo con la base de datos de la **IDEA** sobre empresas de energías renovables, actualmente se tienen registradas 1354 empresas vinculadas con el sector. El siguiente gráfico recoge la distribución por áreas de esas empresas.

Como se puede observar en la gráfica anterior, el área de la energía eólica cuenta con un número mayor de empresas. Por tanto, en lo que se refiere a los aspectos socioeconómicos, las energías renovables y en particular la energía, ya consolidada, eólica, aportan estabilidad a nuestra economía, destacando una mejora y modernización del tejido industrial, la generación de empleo y la contribución al desarrollo regional.

2.3 Futuro de la energía eólica.

La dependencia de combustibles no renovables nos obliga a replantear y cambiar el actual modelo energético, debido a la gravedad de los daños ambientales. La



eficiencia energética, el ahorro energético y las energías renovables son las mejores vías para afrontar el cambio climático y el efecto invernadero que se nos viene encima irremediablemente.

Según el Plan de energías renovables en España 2005-2010, se trata de mantener el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12% el consumo total de energía en 2010.

Síntesis de Escenarios Energéticos y Escenarios de Energías Renovables.

PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2005-2010:

	Producción en términos de Energía Primaria (ktep)			
	2004 (1)	2010		
		Escenarios de Energías Renovables		
		Actual	Probable	Optimista
TOTAL ÁREAS ELÉCTRICAS	5.973	7.846	13.574	17.816
TOTAL ÁREAS TÉRMICAS	3.538	3.676	4.445	5.502
TOTAL BIOCARBURANTES	228	528	2.200	2.528
TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES	9.739	12.050	20.220	25.846
Escenario Energético: Tendencial				
Consumo de Energía Primaria (ktep)	141.567	166.900	167.100	167.350
Energías Renovables/Energía Primaria (%)	6,9%	7,2%	12,1%	15,4%
Escenario Energético: Eficiencia				
Consumo de Energía Primaria (ktep)	141.567	159.807	160.007	160.257
Energías Renovables/Energía Primaria (%)	6,9%	7,5%	12,6%	16,1%

(1): Datos provisionales. Para energía hidráulica, eólica, solar fotovoltaica y solar térmica, se incluye la producción correspondiente

a un año medio, a partir de las potencias y superficie en servicio a 31 de diciembre, de acuerdo con las características de las instalaciones puestas en marcha hasta la fecha, y no el dato real de 2004. No incluidos biogás térmico y geotermia, que en 2004 representan 28 y 8 ktep.

Tabla 3. PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2005-2010

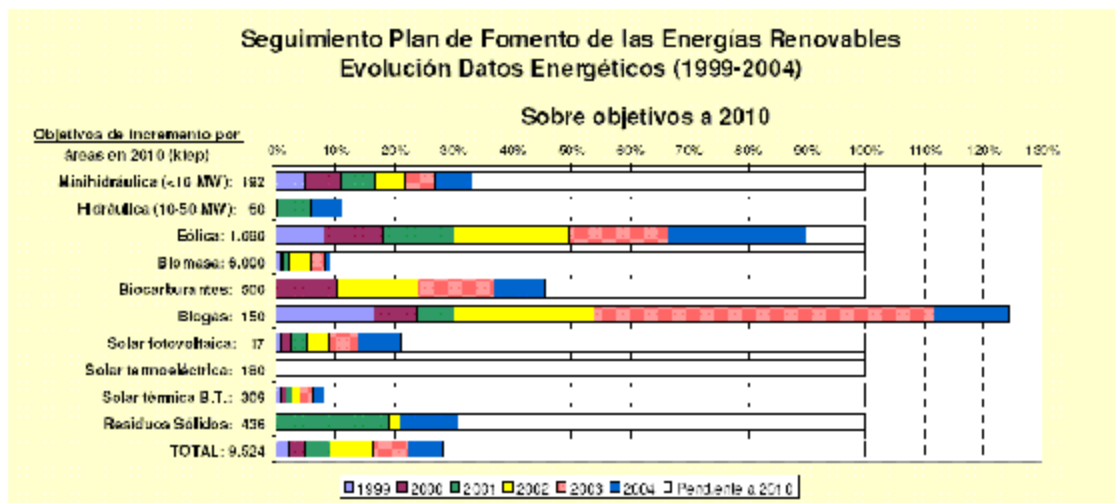


Ilustración 6. Objetivos de incremento para 2010

Por áreas, el crecimiento presenta importantes disparidades. La energía eólica sigue siendo la que presenta un mayor grado de desarrollo, con una importante iniciativa empresarial, en la que se está consolidando un conjunto de empresas, con tecnología propia, en un mercado de excelentes expectativas.

Además, existen factores que propician un mayor impulso en la evolución del sector eólico en España, de los cuales nombramos algunos:

- Existencia de un gran potencial eólico en nuestro territorio todavía sin explotar
- Normativa favorable a conseguir una mayor penetración eólica, que ha permitido consolidar la confianza y el interés de los promotores.
- Sector industrial maduro con firme interés en el sector
- Existencia de tecnología y capacidad de desarrollo de fabricación a escala nacional
- Las planificaciones de los gobiernos autonómicos soportan los objetivos de 2010.
- ***La incorporación de mejoras tecnológicas, en el comportamiento de los aerogeneradores frente a la red, permitirá un alto grado de penetración de la energía eólica, sin afectar a la seguridad de abastecimiento eléctrico.***

Por todo ello, la energía eólica sitúa su nuevo objetivo de incremento en 12.000 MW adicionales en el periodo de 2005 a 2010, lo que supone terminar la década con una potencia total instalada de 20.155 MW repartidas por todo el territorio nacional.

		ÁREA EÓLICA					
		2005	2006	2007	2008	2009	2010
POTENCIA EÓLICA ANUAL	MW	1.800	2.000	2.200	2.200	2.000	1.800
		TOTAL 2005-2010					
		12.000					

Tabla 4. Perspectivas futuras de potencia eólica instalada en España

Si realizamos un desglose del incremento de la potencia instalada en España en el periodo 2005-2010 por comunidades autónomas obtenemos la siguiente tabla:

ÁREA EÓLICA: OBJETIVOS 2010			
Comunidad Autónoma	Situación Año 2004 (MW)	Incremento 2005-2010 (MW)	Potencia al 2010 (MW)
ANDALUCÍA	350	1.850	2.200
ARAGÓN	1.154	1.246	2.400
ASTURIAS	145	305	450
BALEARES	3	47	50
CANARIAS	139	491	630
CANTABRIA	-	300	300
CASTILLA Y LEÓN	1.543	1.157	2.700
CASTILLA - LA MANCHA	1.534	1.066	2.600
CATALUÑA	94	906	1.000
EXTREMADURA	-	225	225
GALICIA	1.830	1.570	3.400
MADRID	-	50	50
MURCIA	49	351	400
NAVARRA	854	546	1.400
LA RIOJA	356	144	500
COMUNIDAD VALENCIANA	21	1.579	1.600
PAÍS VASCO	85	165	250
TOTAL AÑO 2010	8.155 MW	12.000 MW	20.155 MW

Fuente: IDAE

Tabla 5. Perspectivas futuras de potencia eólica instalada por comunidades

Con relación a las instalaciones eólicas ubicadas en el mar, todavía no hay ninguna en nuestro país. Actualmente existen diversos proyectos eólicos marinos *offshore* ambiciosos, que actualmente se encuentran en fase de inicial de diseño e ingeniería básica, en las costas de Cádiz, Huelva, Castellón y en el delta del Ebro. Si se avanza en la resolución de las barreras actuales para su implantación, cabría pensar que en el horizonte del año 2010, estas energías podrían aportar en torno a los 1000 MW.

España se sitúa entre las primeras potencias mundiales, tanto en capacidad eólica instalada como en cuota de mercado de nuestros fabricantes



Por tanto, el futuro de la energía eólica en nuestro país es muy prometedor y ambicioso, por lo que no debe existir ningún inconveniente serio para acometer un desarrollo decidido de la energía eólica, ni ocupación del suelo (compatibles con otros usos), ni económicos, ni ambientales , ni sociales.

2.4 Conclusiones

Según todo lo expuesto anteriormente, es urgente e indispensable aprovechar las inmensas reservas de las fuentes de energías renovables, ecológicas y sostenibles,



que encierra el ecosistema terrestre. Los ciclos atmosféricos e hidráulicos, la radiación solar, **la energía eólica**, la energía de los vegetales, la geotermia y la utilización de las propiedades combustibles del hidrógeno constituyen yacimientos a la espera de ser explotados. Dar curso a esta prioridad exige, no obstante, un profundo cambio en nuestras formas centralizadas de producción y consumo.

Tras firmar el **protocolo de Kioto** y comprometerse a reducir el efecto invernadero, Europa se ha fijado el objetivo de duplicar la proporción de energías renovables de aquí a diez años. **Los proyectos de investigación** desempeñan un papel fundamental en esta política voluntarista. Están encaminados no sólo a la **innovación tecnológica**, sino también a permitir salvar los obstáculos estructurales a la integración de los recursos sostenibles en nuestra vida diaria.

Unos de los principales campos encaminados a la innovación tecnológica es el de los sistemas electrónicos de acondicionamiento de potencia. El presente proyecto intentará dar una visión de innovación respecto a la utilización de convertidores CC/CA multinivel de electrónica de potencia.



Actualmente, las principales líneas de investigación están orientadas hacia aplicaciones en energías renovables, un sector con grandes expectativas de crecimiento a corto y medio plazo. Dentro de las energías renovables, cabe destacar el creciente interés por los convertidores CC/CA de tres niveles frente a los convertidores de dos niveles convencionales, para el aprovechamiento tanto de la energía eólica, como solar fotovoltaica mediante la conexión directa a la red eléctrica.

3. TIPOS Y USOS DE CONVERTIDORES CC/CA ACTUALES

Desde el desarrollo de la electrónica de potencia, los convertidores CC/CA han sido y son en la actualidad ampliamente usados en el sector industrial y en el de generación de energía.

Aplicaciones comunes de los inversores son:

1. Control de velocidad de motores de CA, ya que mediante el inversor se puede controlar la amplitud y frecuencia de la onda de tensión aplicada al motor.
2. Fuentes de alimentación ininterrumpida, proporcionando una tensión senoidal a partir de la tensión continua que proporciona una batería, con el fin de sustituir la red de suministro convencional cuando se ha producido un corte en el suministro eléctrico.
3. Generación fotovoltaica, generando tensión senoidal con una frecuencia de 50 Hz a partir de la tensión continua producida por una serie de paneles fotovoltaicos.
4. Generación eólica, ya que en este sector es cada vez más frecuente encontrar aerogeneradores asíncronos, de modo que se necesita del convertidor para adecuar la onda proporcionada por el aerogenerador (que responde a criterios de máximo rendimiento) para que pueda ser inyectada la energía en la red de distribución.
5. Enlaces CC-CC entre redes de HV, volviendo a transformar la energía de CC a CA.
6. Compensadores estáticos de energía reactiva, ya que con el adecuado control se puede determinar el factor de potencia, y con este la energía reactiva que fluye a través del inversor.



La clasificación que se puede hacer de los convertidores CC/CA no es única, sino que depende de la consigna a tomar, ya sea por tipo de fuente, frecuencia, dispositivos, resonancia u otros aspectos a considerar. Por este motivo, se muestran a continuación diferentes clasificaciones de convertidores CC/CA:

En función del carácter del mismo como fuente de alimentación:

- **Inversores con fuente de corriente (CSI).**
- **Inversores con fuente de tensión (VSI).**

La frecuencia de trabajo del mismo:

- **Inversores de baja frecuencia (onda cuadrada).**
- **Inversores de alta frecuencia (modulación por anchura de pulsos).**

En función de los dispositivos semiconductores con los que esté constituido:

- **Inversores de transistores bipolares.**
- **Inversores de MOSFET's.**

Son para bajas potencias, del orden de algunas decenas de kilovatios como mucho. Los dispositivos MOSFET, presentan las ventajas de que son rápidos conmutando y son fácilmente controlables al ser controlados por tensión, pero no soportan tensiones muy elevadas.

- **Inversores de IGBT's.**

Se usan para potencias intermedias, de hasta varios centenares de kilovatios. También son fáciles de controlar (son controlados por tensión). Soportan tensiones mayores que los MOSFET, y velocidades de conmutación cercana a la de estos, y capaces de operar con niveles altos de corrientes, pero en conducción presentan mayores caídas de tensión que los MOSFET.

- **Inversores de tiristores.**
- **Inversores de GTO's.**

Se usan para potencias muy elevadas, del orden de megavatios. Son dispositivos que soportan la muy alta tensión y grandes corrientes pero tienen mayores pérdidas en conmutación, por lo que la frecuencia de conmutación será menor.

En función de su tipo de funcionamiento:

- **Inversores no resonantes.**
- **Inversores resonantes.**

En función del número de fases:



- **Puente completo monofásico.**

Son usados en aplicaciones de pequeña potencia.

- **Puente trifásico.**

Son los más utilizados en el ámbito industrial, ya que en este sector las cargas son generalmente trifásicas, debido entre otros motivos a su mayor potencia.

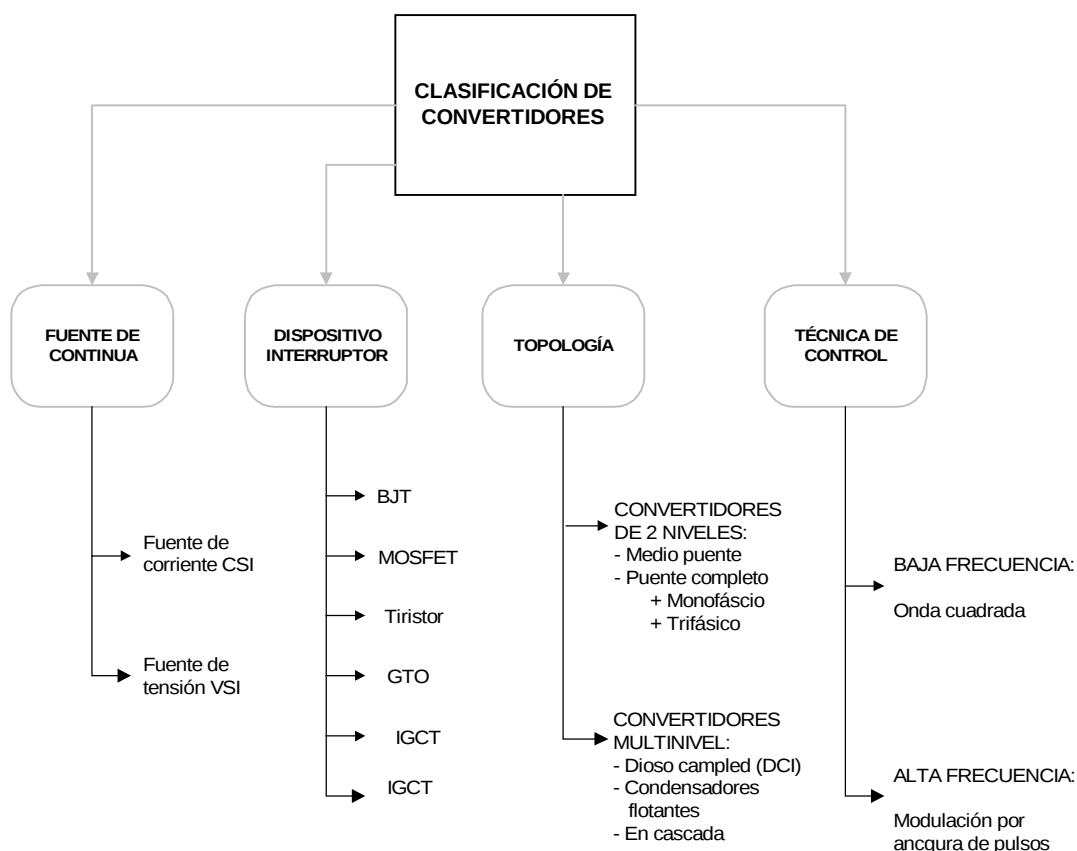


Ilustración 7. Esquema de clasificación de convertidores

3.1 Topología de los convertidores CC/CA de dos niveles

En este apartado se describe el funcionamiento y topología de los inversores VSI, con dispositivos de disparo IGCTs, de dos niveles de puente completo y por modulación por anchura de pulso.

3.1.1 Inversor puente completo monofásico

La topología más extendida en aplicaciones de baja potencia es la del inversor en fuente de tensión (VSI) monofásico en puente completo, cuya estructura viene esquematizada en la figura 8.

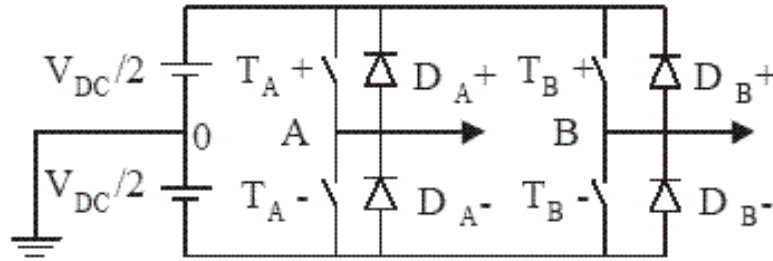


Ilustración 8. Inversor monofásico en puente completo

A continuación, se describe el funcionamiento teórico de inversor monofásico. El inversor consta de un condensador de capacidad C_{dc} o dos capacidades exactamente iguales, separadas por tierra, como es en este caso, en la entrada de corriente continua (también llamada *bus de continua*), cuya tensión debe mantenerse constante. El inversor monofásico está formado por dos ramas, A y B, cada una de ellas constituidas por dos interruptores y dos diodos conectados en antiparalelo cuya función es permitir que la circulación de corriente a lo largo de la rama sea bidireccional. Los interruptores se modelan mediante sus funciones de conmutación, S_{ij} , que permiten conectar cada fase al punto “p” o al punto “n”. Con este montaje, se puede conseguir que la tensión de salida sea nula, si las dos ramas están conectadas al mismo punto, positiva V_{pn} o negativa $-V_{pn}$, según cómo estén conectadas a “p” y “n”.

El número de estados que puede presentar un convertidor se define como el número de posibles combinaciones entre las posiciones de sus conmutadores. Para determinar el número de estados que se puede llegar a alcanzar, hay que establecer las restricciones que deben cumplir sus funciones de conmutación, S_{ij} , definidas en la siguiente ecuación,

$$\begin{aligned} S_{ij} &= 1, \text{ si rama } i \text{ conectada al punto } j & j &\in \{p, n\} \\ S_{ij} &= 0, \text{ si no} & i &\in \{a, b\} \end{aligned}$$

La primera restricción establece que una misma rama no debe conectarse a dos puntos de tensión diferentes simultáneamente, ya que se produciría un cortocircuito en la fuente de tensión. Para evitar esta situación se impone que sólo conduzca uno de los dos interruptores de cada rama, condición que matemáticamente viene expresada por la ecuación,

$$S_{ip} + S_{in} \leq 1 ; \quad i \in \{a, b\}$$

La segunda restricción establece que ninguna rama quede sin conexión al bus de continua, ya sea al punto “p” o “n”, de manera que siempre circule corriente por una de ellas y la carga no quede en circuito abierto. Este requisito viene reflejado en la siguiente expresión, donde al menos uno de los interruptores de cada rama conduce para permitir el paso de corriente.

$$S_{ip} + S_{in} \geq 1 ; \quad i \in \{a, b\}$$

La última ecuación combina estas dos restricciones y determina la relación existente entre las funciones de conmutación de cada rama,

$$S_{ip} + S_{in} = 1 ; \quad i \in \{a, b\}$$

Si se considera por ejemplo la rama A del inversor, cuando el interruptor S_{ap} conduce ($S_{ap} = 1$), el interruptor S_{an} debe estar abierto ($S_{an} = 0$), de manera que la corriente de salida circule a través de S_{ap} , si es positiva, o de su diodo en antiparalelo, si es negativa, fijando el punto “a” al potencial del punto “p”, es decir, $V_a = V_p$.

Análogamente, si el interruptor S_{ap} está abierto ($S_{ap} = 0$), S_{an} permanece cerrado ($S_{an} = 1$), de modo que la corriente de salida circula a través de S_{an} si es negativa o de su diodo en antiparalelo si es positiva, y el punto “a” se fija a la tensión del punto “n”, es decir, $V_a = V_n$.

En función de cómo estén conectados los interruptores de la rama B, habrá un determinado valor de tensión a la salida del inversor ($V_{ab} = V_a - V_b$). La tabla 6 recoge los cuatro posibles estados que puede presentar el inversor, en función de la posición de sus conmutadores.

Nº de estado	Funciones conmutación				Conexión rama		Tensión de salida V_{ab}
	S_{ap}	S_{an}	S_{bp}	S_{bn}	a	b	
1	0	1	0	1	n	n	0
2	0	1	1	0	n	p	$-V_{pn}$
3	1	0	0	1	p	n	V_{pn}
4	1	0	1	0	p	p	0

Tabla 6. Estados de conmutación de un inversor monofásico de 2 niveles



Puesto que la tensión alterna de salida sólo puede tomar los valores 0, V_{pn} y $-V_{pn}$, su forma de onda es discreta y cuadrada, distando mucho de la senoide que se desea obtener. Para solventarlo se incorpora un filtro en la salida del inversor. Este filtro permite suavizar la forma de onda, filtrando los armónicos de alta frecuencia para dejar pasar, teóricamente, sólo la componente fundamental a la frecuencia de trabajo (en este caso la frecuencia de la red). El tamaño del filtro está íntimamente ligado a la estrategia de modulación empleada. La modulación tiene por objetivo controlar la apertura y cierre de los conmutadores para obtener unas determinadas formas de onda, tan próximas a una senoide como sea posible.

En cuanto al modelo físico con interruptores en un inversor de dos niveles, las funciones de conmutación de los interruptores del sistema físico serán según nuestro esquema,

$$\begin{aligned} S_{ap} &= T_{a+} & ; & & S_{an} &= T_{a-} \\ S_{bp} &= T_{b+} & ; & & S_{bn} &= T_{b-} \end{aligned}$$

No obstante, en el sistema físico las conmutaciones de los interruptores de una misma rama no se producen a la vez. Para evitar que durante la transición se llegue a un estado intermedio no deseado que pueda provocar un cortocircuito, se impone que antes de cerrar el segundo interruptor el primero ya esté abierto. La figura 9 esquematiza la transición válida entre dos estados de conmutación para la rama A, siendo la de la rama B simétrica a ésta.

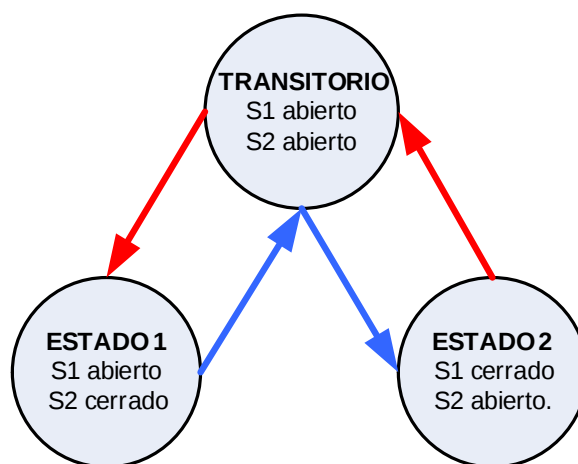


Ilustración 9. Transiciones válidas entre dos estados de conmutación.

3.1.2 Inversor puente trifásico

Los inversores trifásicos se utilizan normalmente en aplicaciones de alta potencia. La figura 10 muestra la topología de un inversor VSI trifásico en puente completo.

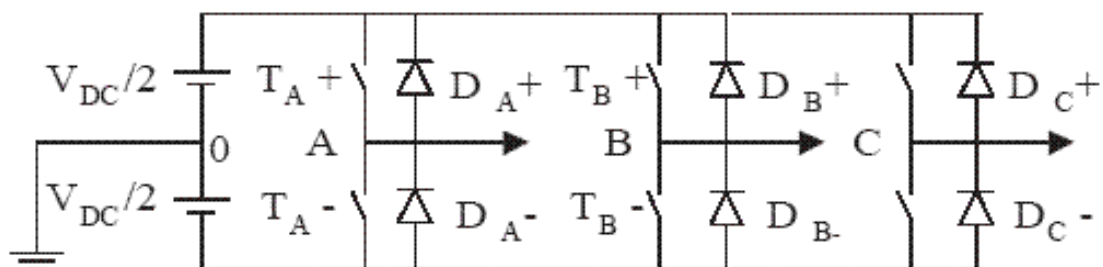


Ilustración 10. Inversor de dos niveles trifásico de puente completo

El esquema del inversor VSI de dos niveles trifásico es análogo al del inversor monofásico, con la diferencia de que en este caso consta de tres ramas de fase, A, B y C, cada una con sus respectivos interruptores y diodos.

Toda rama dispone de dos interruptores modelados mediante sus funciones de conmutación, S_{ij} , que permiten conectar cada fase al punto “p” o al punto “n”, tal como muestra,

$$\begin{aligned} S_{ij} &= 1, \text{ si rama } i \text{ conectada al punto } j & j &\in \{p, n\} \\ S_{ij} &= 0, \text{ si no} & i &\in \{a, b, c\} \end{aligned}$$

Las leyes que rigen el comportamiento de las funciones de conmutación de un inversor trifásico, definidas en la ecuación siguiente, son análogas a las de uno monofásico,

$$S_{ip} + S_{in} = 1 \quad ; \quad i \in \{a, b, c\}$$

Según estas restricciones, cada fase puede alcanzar dos posibles valores de tensión (V_p ó V_n), y puesto que existen tres ramas, el inversor puede presentar $2^3 = 8$ estados de conmutación, tal y como recoge la tabla 7.

Nº de estado	Funciones de conmutación						Conexión fase			Tensiones compuestas		
	S_{ap}	S_{an}	S_{bp}	S_{bn}	S_{cp}	S_{cn}	a	b	c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	0	1	0	1	0	1	n	n	n	0	0	0
2	0	1	0	1	1	0	n	n	p	0	$-V_{pn}$	V_{pn}
3	0	1	1	0	0	1	n	p	n	$-V_{pn}$	V_{pn}	0
4	0	1	1	0	1	0	n	p	p	$-V_{pn}$	0	V_{pn}
5	1	0	0	1	0	1	p	n	n	V_{pn}	0	$-V_{pn}$
6	1	0	0	1	1	0	p	n	p	V_{pn}	$-V_{pn}$	0
7	1	0	1	0	0	1	p	p	n	0	V_{pn}	$-V_{pn}$
8	1	0	1	0	1	0	p	p	p	0	0	0

Tabla 7. Estados de conmutación de un inversor trifásico de 2 niveles.

Al igual que en el inversor monofásico, la tensión compuesta de salida sólo puede tomar los valores 0, V_{pn} y $-V_{pn}$, de manera que tiene una forma de onda cuadrada. Para conseguir que sea senoidal se incorporan tres filtros iguales la salida del inversor, uno en cada fase.

Respecto al modelo con interruptores, las funciones de conmutación coinciden con los interruptores del sistema físico de la figura 8.

$$\begin{aligned}
 S_{ap} &= T_{a+} & ; & & S_{an} &= T_{a-} & ; & & S_{cp} &= T_{c+} \\
 S_{bp} &= T_{b+} & ; & & S_{bn} &= T_{b-} & ; & & S_{cn} &= T_{c-}
 \end{aligned}$$

Las transiciones necesarias para evitar estados intermedios no deseados son las de la figura 11.

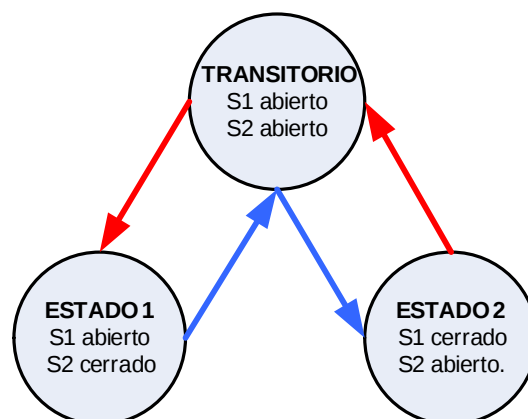


Ilustración 11. Transiciones válidas entre dos estados de conmutación.

3.2 Principales elementos constitutivos

El inversor está formado, principalmente, por dos tipos de elementos semiconductores: interruptores de potencia y diodos.

3.2.1. Interruptores de potencia

Los interruptores son el elemento principal del inversor, ya que su número, secuencia y frecuencia de conmutación determinan la forma de onda de la tensión de salida del inversor.

Estos interruptores deben ser completamente controlables, tanto en la conexión como en la desconexión. Entre los principales semiconductores de potencia controlables destacan los GTO, los BJT, los MOSFET, los IGBT/IGCT y los MCT. La tabla 8 resume las principales características de estos semiconductores de potencia. Los semiconductores más empleados son MOSFET e IGBT. Es común el empleo de MOSFET en los sistemas monofásicos, que son de baja potencia, e IGBT/IGCT en los trifásicos, que son de media y alta potencia.

	GTO	BJT	MOSFET	IGBT	MCT
Tensión máxima de corte (V)	3.000	1.000	1.000	2.000	2.000
Corriente máxima (A)	2.000	600	100	500	600
Frecuencia máxima (kHz)	1	10	1.000	60	20
Señales de conmutación	Corriente	Corriente	Tensión	Tensión	Tensión

Tabla 8. Principales características de los semiconductores de potencia.

La elección del interruptor depende de las especificaciones de funcionamiento de cada inversor, como, por ejemplo, las tensiones y corrientes nominales a las que trabaja, y la frecuencia de conmutación. Normalmente se utilizan interruptores controlados por tensión, ya que los drivers resultan más simples y económicos. Los drivers son circuitos de acondicionamiento de las señales de control, encargados de transformar señales externas lógicas, TTL o CMOS, en señales para hacer conmutar los interruptores.

3.2.2. Diodos

El segundo tipo de elemento a considerar son los diodos, conectados en antiparalelo con los interruptores. La presencia de cargas con un cierto comportamiento inductivo ocasiona un cierto desfase entre tensión y corriente, de manera que en un determinado instante la tensión puede ser positiva y la corriente negativa. El objetivo

de estos diodos es permitir que la circulación de corriente sea bidireccional. Los diodos utilizados se conocen con el nombre de diodos de recuperación rápida, ya que es necesario que los retrasos que introducen no sean mayores que los de los del interruptor elegido. La figura 12 muestra la configuración de los interruptores GTO e IGBT con sus respectivos diodos en antiparalelo (Capturas mediante el programa PSCAD).



Ilustración 12. Transistor (a) IGBT y (b) GTO con su diodo en antiparalelo.

Las consideraciones realizadas para elección de los interruptores y diodos son las mismas en los inversores de dos y tres niveles. La única diferencia radica en la tensión máxima que deberán soportar los semiconductores. Para el caso de dos niveles, la tensión de bloqueo es la del bus de continua V_{pn} , mientras que para el inversor de tres niveles la tensión de bloqueo es la mitad, es decir, $V_{pn}/2$, lo cual le permite trabajar al doble de tensión en el bus de continua con la misma corriente. Esta característica es una de las principales ventajas en los inversores de tres niveles, ya que permite trabajar con mayores potencias de entrada.

3.3 Técnicas de control actuales de convertidores de dos niveles

En la mayoría de las aplicaciones de los inversores electrónicos VSI actuales es necesario ajustar el valor de la tensión alterna (magnitud escalar), que se obtiene a la salida entre unos márgenes adecuados para la aplicación concreta a la que se destine el inversor electrónico. La regulación de la tensión, que se obtiene a la salida del inversor, va a depender de la señal de referencia, que controla el funcionamiento del inversor y determina los pulsos de disparo de los interruptores controlados que lo constituyen. La señal de referencia se determina a partir de los lazos de realimentación disponibles en el sistema y serán los responsables de compensar las variaciones que se puedan producir en la carga, en la tensión de alimentación, temperatura de trabajo de los inversores electrónicos, ráfagas de viento existente, etc.

Se muestran algunas técnicas de control más utilizadas en la actualidad.



3.3.1 Modulación PWM Senoidal

El control de la tensión de salida se efectúa mediante la variación del ancho de varios pulsos por semiperiodo con una separación variable entre los pulsos. En un inversor monofásico se obtiene las señales de control mediante la comparación de una señal senoidal que actúa de referencia (V_{ref}), cuya amplitud es $\hat{V}_{ref}$ y de frecuencia f_{ref} , y una señal triangular V_{tri} cuya amplitud es $\hat{V}_{tri}$ y de frecuencia f_{tri} , la cual mantiene constante siempre su amplitud. El resultado de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor electrónico. La frecuencia de la señal de referencia es siempre constante y determina la frecuencia de la tensión de salida y la frecuencia de la señal triangular determinada el número de pulsos “p” por semiciclo.

La variación de la tensión de salida desde los 0 voltios hasta la tensión máxima de salida se realiza mediante la variación de la amplitud de la señal senoidal de referencia (V_{ref}), la cual determina la variación del ancho de los pulsos δ desde un valor mínimo de 0° hasta un valor máximo, que depende de la relación entre la frecuencia de la señal de referencia y la de la señal triangular (índice de modulación de frecuencia) y que también depende de la relación entre las amplitudes de las dos señales citadas (índice de modulación de amplitud). Las señales de control típicas de esta técnica de modulación se muestran en la siguiente figura,

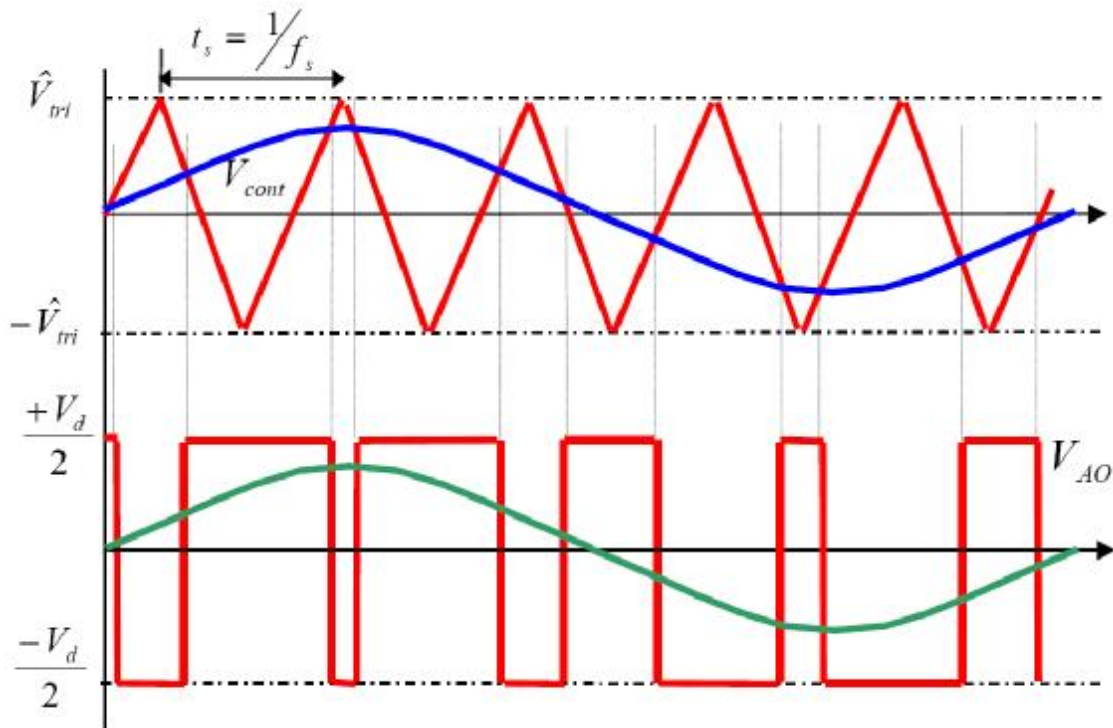


Ilustración 13. Formas de onda en una rama de un puente inversor

Para realizar el análisis del control PWM en los inversores electrónicos de salida senoidal, en este caso se va a realizar el estudio de una rama de un puente inversor, es necesario definir algunos parámetros. El índice de modulación de amplitud se designa por la m_a y su valor es:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{ref}}{\hat{V}_{tri}}$$

Ecuación 1. Modulación de amplitud

El índice de modulación de frecuencia se designa por la m_f y su valor es:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Ecuación 2. Modulación de frecuencia

Donde f_s es la frecuencia de conmutación de los interruptores, que es de igual valor que la frecuencia triangular, y f_1 que es la frecuencia de la señal senoidal de referencia y que coincidirá con la componente armónica fundamental de la tensión de salida del inversor.

Al realizar la comparación entre la señal triangular y la señal senoidal se obtiene:

$$V_{ref} < V_{tri} \Rightarrow T1 \rightarrow \text{off}; T2 \rightarrow \text{on} \Rightarrow V_{AO} = -\frac{V_{dc}}{2}$$

$$V_{ref} > V_{tri} \Rightarrow T1 \rightarrow \text{on}; T2 \rightarrow \text{off} \Rightarrow V_{AO} = +\frac{V_{dc}}{2}$$

Dado que los interruptores conducen alternativamente, la tensión a la salida de la rama varía continuamente entre los valores de continua (+Vdc/2 y -Vdc/2). Si se realiza el análisis del desarrollo de fourier de la tensión de salida del inversor, se obtiene que el contenido de armónico de la tensión de salida Vao se ha normalizado

$(V_{AO})_n / (1/2 \cdot V_{dc})$. Se llega a las siguientes conclusiones:

- ◆ El valor de pico de la componente armónica fundamental $(V_{AO})_1$ es $m(1/2V_{dc})$. Para explicar esto se parte de considerar una V_{ref} constante y de valor siempre inferior al valor máximo de la señal triangular. Esta consideración implica que la frecuencia de la señal triangular f_s es muy superior a la frecuencia de la señal senoidal de referencia f_1 , o lo que es lo mismo, tener valores altos de mf .
- ◆ Los armónicos en la salida del inversor aparecen como bandas laterales centradas sobre la frecuencia de conmutación y sus múltiplos.
- ◆ El valor de mf debe ser un entero impar de forma que la señal presentará simetría impar y además simetría de media onda, lo que simplifica su análisis.

Si mf es grande, durante el tiempo t_s la señal de control de referencia no variará, y el valor medio ciclo a ciclo irá coincidiendo con el valor de la senoide $V_{a,cont}$ por semejanza de triángulos:

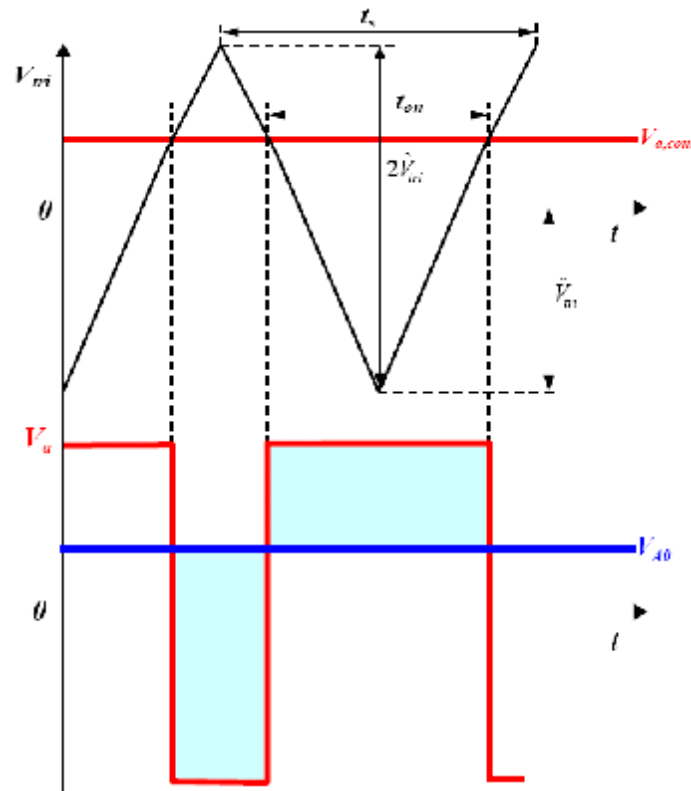


Ilustración 14. Modulación PWM senoidal

Para una señal de control del tipo $V_{ref} = \hat{V}_{ref} \cdot \sin w_1 \cdot t$ donde la amplitud de la señal de control no sea mayor que la de la señal triangular, la componente armónica fundamental $(V_{AO})_1$ varía senoidalmente con una pulsación w_1 y en fases con V_{ref} . Para valores de ma menores de 1, el valor máximo o amplitud que alcanza la componente armónica fundamental es igual a:

$$(V_{AO})_1 = m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad ; m_a \leq 1$$

Ecuación 3. Componente armónica fundamental

Cuando se cumple la condición $m_a \leq 1$, se observa que las componentes armónicas de la tensión de salida del inversor electrónico aparecen como bandas laterales centradas alrededor de la frecuencia de conmutación y múltiplos de mf ($mf, 2mf, 3mf \dots$)

El armónico de orden n correspondiente a la banda lateral de orden a veces el índice de modulación en frecuencia mf es $n = a \cdot mf \pm b$. En la siguiente tabla se



muestran los valores de las amplitudes de los armónicos normalizadas para $(V_{AO})_n / \frac{1}{2} \cdot V_{dc}$, tabulados en función del índice de modulación de amplitud m_a suponiendo que $m_f \geq 9$. Sólo se indican aquellos con amplitudes significativas, hasta para valores de $a = 4$,

$m_a \Rightarrow$ $h \Downarrow$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1 (Fund.)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
m_f	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

Ilustración 15. Amplitudes de armónicos

En todo el análisis anterior se ha considerado que el índice de modulación de amplitud era inferior o igual a 1, correspondiente a la denominada zona lineal del control PWM senoidal. En esta zona, la amplitud de la componente fundamental obtenida a la salida del inversor es linealmente dependiente del valor de m_a . La ventaja que presenta es que los armónicos aparecen a altas frecuencias alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos. Un inconveniente que presenta trabajar en esta zona es que la amplitud de la componente armónica fundamental no es todo lo grande que se podría desear.

Para poder incrementar más la amplitud de la componente armónica fundamental es la tensión de salida, el valor de m_a debe superar el valor de la unidad, lo que se

denomina sobremodulación ($ma \geq 1$). Trabajar en esta zona de sobremodulación provoca la aparición de más cantidad de armónicos en las bandas laterales que en el caso de trabajar en la zona lineal. Las componentes armónicas con amplitudes significativas, cuando se trabaja en zona lineal, pueden no ser las más importantes al pasar a la zona de sobremodulación. En la siguiente figura se muestra la amplitud máxima normalizada en función del índice de modulación (ma),

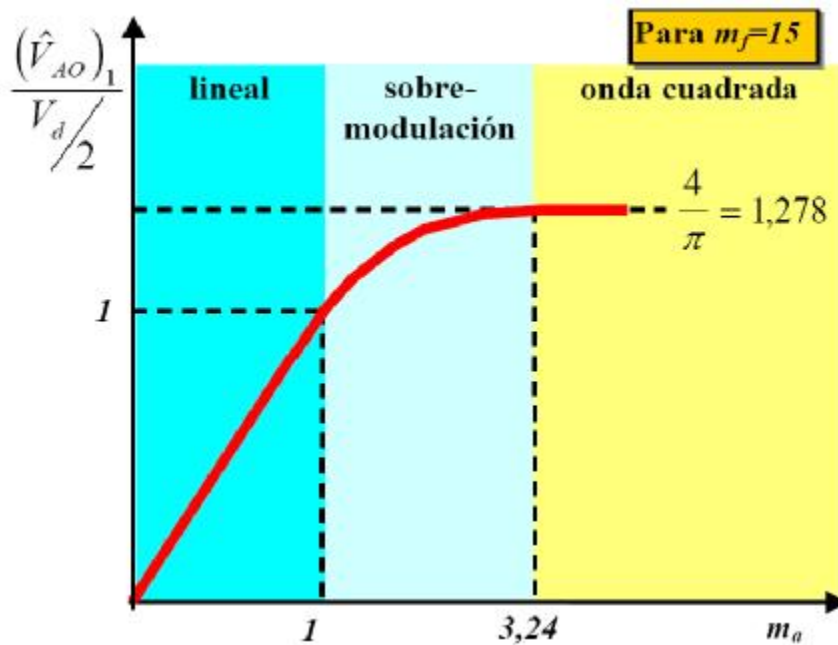


Ilustración 16. Tensión de salida normalizada en función de ma

3.3.2 Modulación Bang-Bang

En algunas aplicaciones, el parámetro que hay que controlar es la corriente que circula a la salida del inversor. Básicamente, hay dos técnicas para poder realizar dicho control:

1. Control de la corriente por una banda de tolerancia (Bang-Bang)
2. Control de la corriente por frecuencia fija.

El diagrama de bloques del control de la corriente por una banda de tolerancia o histéresis, se muestra en la figura 17,

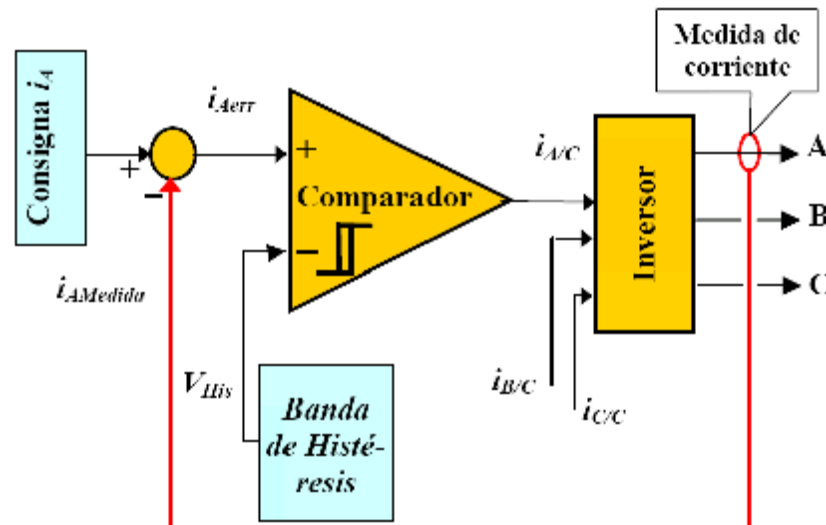


Ilustración 17. Control Bang-Bang de un inversor

Una señal de referencia senoidal I_{Aref} se compara con la corriente que circula por la fase $I_{Amedida}$, con una banda de tolerancia alrededor de la corriente de referencia de cada fase. Como resultado de dicha comparación se obtienen las señales de disparo correspondientes a la rama del inversor correspondiente a dicha fase.

Cuando el interruptor T1, conectado al bus de continua positivo, conduce la corriente por la rama, aumenta, ya que la tensión del bus de continua es superior a la tensión en la salida. Si la corriente instantánea en la salida del inversor trata de superar el límite superior de la banda de tolerancia, entonces el interruptor T1 se bloquea y se pone a conducir el interruptor T2, conectado al terminal más negativo del bus de continua. Al estar T2 en conducción la corriente por la salida, tiende a disminuir y, cuando intenta ser menor que el límite inferior de la banda de tolerancia, el interruptor T2 dejará de conducir y entrará en conducción el interruptor T1. Las formas de onda de la corriente, mostrando la banda de tolerancia y la corriente de referencia, se muestra en la figura 18,

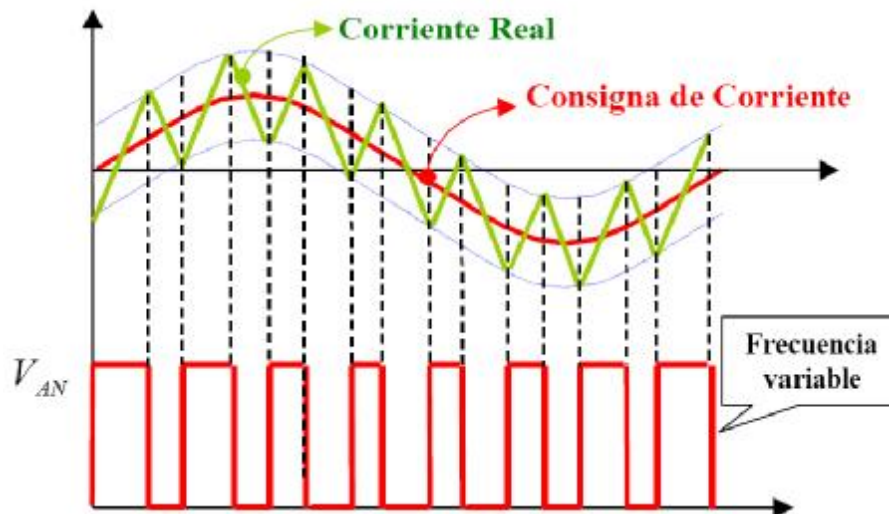


Ilustración 18. Modulación Bang-Bang

4. CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL

4.1 Introducción y principales características de los convertidores CC/CA Multinivel

Hagamos una breve introducción al estudio de un inversor multinivel. En el presente trabajo se estudia la simulación (Mediante la utilización del programa PS-CAD/EMTDC) del flujo de energía eléctrica por los diferentes dispositivos electrónicos de potencia en un aerogenerador, con la importante novedad de la utilización de inversores multinivel. Estos inversores son aquellos que usan más de dos niveles de tensión de continua (bornes de una batería) para modular la onda alterna de salida.

Las principales ventajas que se derivan directamente del uso de más niveles de tensión son que las ondas de salida tienen un menor contenido armónico, además, los valores absolutos de tensiones se reparten entre los interruptores de potencia, por lo que, o bien se pueden usar interruptores de valores nominales menores para entregar la misma potencia, o bien usar el mismo tipo de interruptor pudiéndose entregar mayor potencia.

Las ventajas de los inversores multinivel, respecto a los inversores comerciales que existen actualmente en el mercado de dos niveles, son numerosas, como se estudiarán a lo largo del presente trabajo, pero cabe destacar que son capaces de dar un menor contenido armónico en las tensiones e intensidades, y, por tanto, una mejor



calidad de onda de salida para unas mismas condiciones de operación de los interruptores de potencia. El hecho de que los inversores multinivel sean capaces de suministrar una mejor calidad de onda tiene como consecuencia directa un ahorro sustancial en los filtros de salida del inversor, y será aun mayor conforme aumenta la potencia manejada.

Otra ventaja fundamental de los inversores trinivel es su ventaja económica frente a los de dos niveles para elevadas potencias, debido a que para una potencia y un nivel



de tensión del bus de continua determinada, la tensión que tienen que soportar los interruptores de potencia en el caso del inversor trinivel es la mitad que en los inversores de dos niveles. Esta circunstancia, en inversores trinivel, provoca, que a partir de un determinado

nivel de tensión, y por tanto de potencia, el ahorro debido al hecho de que los interruptores necesarios tienen un menor requerimiento en tensión máxima soportada, compensa el sobre-costo provocado por la necesidad de disponer de un mayor número de dispositivos.

No todo alrededor de los inversores multinivel son ventajas, por ejemplo, para la implementación de uno de estos equipos hace falta un mayor número de interruptores de potencia. Aunque teniendo en cuenta que fijada la potencia del equipo, los interruptores son de menor potencia, existirá un valor de potencia para cada tipo de interruptor, que hará favorable económicamente el uso de inversores multinivel, por lo que este aspecto no es necesariamente una desventaja. Por otro lado, los inversores multinivel tienen una desventaja inherente que consiste en que el control se complica debido al mayor número de elementos a controlar. Sin embargo, debido al continuo abaratamiento de los procesadores digitales, y al desarrollo de nuevos algoritmos de control específicos para este tipo de inversores hace que esta dificultad no sea determinante en el coste final del equipo.

En la figura 19, se muestra un esquema básico de inversores con (a) dos (b) tres y (c) m niveles, donde los semiconductores de potencia están representados por interruptores ideales de varias posiciones.

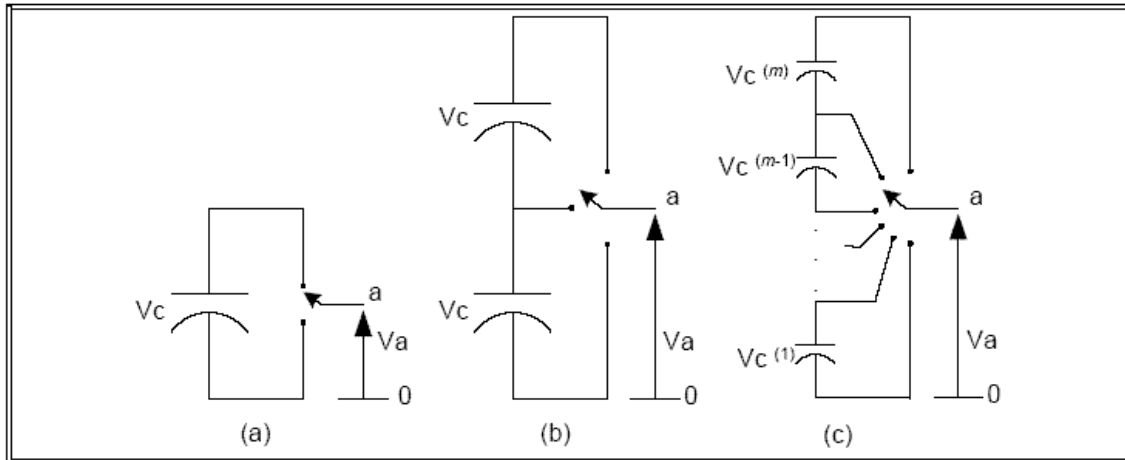


Ilustración 19. Inversor de (a) 2 niveles, (b) 3 niveles, (c) m niveles.

Generalizando, para este tipo de configuración, el número de niveles de la onda de voltaje de salida m de un inversor con n fuentes de voltaje queda determinado por la siguiente fórmula:

$$m = n + 1$$

Mientras mayor es el número de niveles de un inversor, mayor será el número de componentes y más complicado resulta el control para éste, pero por otro lado, el voltaje de salida tendrá mayor cantidad de pasos, formando una sinusoide escalonada con menor distorsión armónica. En la figura 20, se muestra la señal obtenida con distintos números de niveles de tensión de salida (3, 11, 31 y 81) y sus respectivas distorsiones armónicas, las que claramente disminuyen con el aumento de los números de niveles.

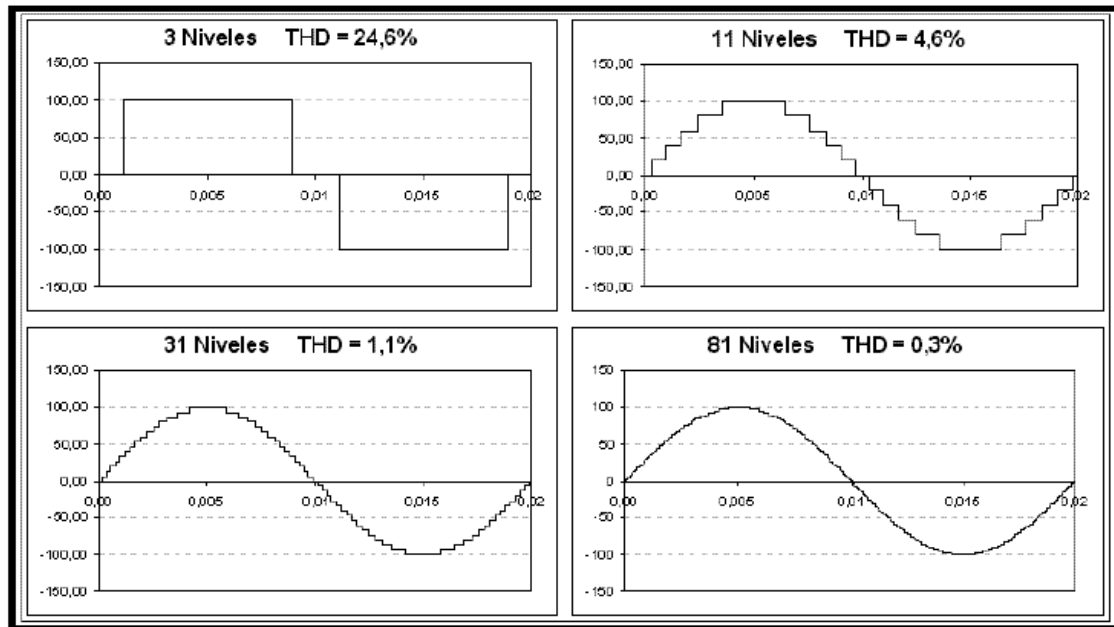


Ilustración 20. Número de niveles y su distorsión armónica

Por otro lado, para aumentar el número de niveles es necesario incorporar mayor número de componentes, tanto en la electrónica de potencia como en la de control, lo que influye en la confiabilidad del equipo.

Finalmente, puntualicemos las principales ventajas de los inversores multinivel:

- a) Pueden generar voltajes de salida con distorsión extremadamente pequeña.
- b) Las corrientes de salida son de muy baja distorsión.
- c) Pueden operar con baja frecuencia de conmutación.

Como breve resumen, el desarrollo de los convertidores multinivel se propicia por el incremento de la demanda de potencia, con conexión a mayor tensión, como es el caso del alto incremento de potencia en los sistemas eólicos, y se posibilita gracias al progreso de la tecnología de los semiconductores de potencia (IGBT e IGCT) y de los sistemas de control digital (DSP), así como, la disminución de sus costes.

4.2 Futuro de los convertidores CC/CA multinivel para sistemas de energía eólica



Un convertidor multinivel permite sintetizar una forma de onda sinusoidal de tensión a partir de varios niveles de tensión, obtenidos típicamente a partir de fuentes de tensión capacitivas. Los convertidores multinivel permiten incrementar la tensión de alterna sin utilizar transformador. Además, la reducción de armónicos de baja frecuencia debido a los diferentes niveles de tensión del convertidor hace posible disminuir el tamaño de las inductancias.

Dado el creciente interés en mejorar la calidad de la onda, que estudiaremos en el apartado de normativas, de los sistemas convertidores de potencia que inyectan en la red a partir de fuentes de energía eólica, comienza a adquirir una gran importancia el desarrollo de los convertidores multinivel, especialmente el de tres niveles, en este tipo de aplicaciones. Pues son los sistemas de potencia idóneos en aplicaciones de tecnologías que tienden a aumentar la potencia de generación y a mejorar el aprovechamiento de la energía disponible.



Por tanto, considerando una mayor reducción de armónicos que da lugar a una señal de salida de mayor calidad y a una disminución del tamaño de las inductancias, así como al empleo de mayores tensiones, permitiendo aumentar la potencia del convertidor sin necesidad de aumentar la corriente. Una buena conclusión se puede deducir de los convertidores multinivel aplicados a los sistemas de energía eólica, los convertidores multinivel constituyen ya una interesante alternativa a los convertidores de dos niveles convencionales para conectar en serie o en paralelo una red de alterna con fuentes de energía eólica,

4.3 Justificación del actual proyecto

Una importante área de aplicación de convertidores multinivel es la conversión de potencia en energía eólica. La necesidad de altas intensidades de corriente utilizando bajos niveles de tensión para generación de potencias del orden de varios megavatios obligan a modificar el diseño de los generadores de corriente eléctrica y los convertidores de potencia.

Además, la utilización de convertidores multinivel permiten la conexión directa de aerogeneradores a la red de media tensión, sin la necesidad de utilizar transformadores, que normalmente son de alto costo. La utilización de convertidores multinivel para controlar la frecuencia y la tensión de salida, incluyendo el ángulo de fase a partir de fuentes de energía renovable, proporcionan ventajas muy significativas debida a la rápida respuesta y al control autónomo que presentan.

Como conclusión, y entendiendo todo lo expuesto en el estado del arte de las energías renovables y el gran incremento de potencia inyectada en red en Europa y particularmente en España mediante sistemas de energía eólica, tenemos ante nosotros el futuro de la generación de energía eléctrica y, para ello, se hacen grandes esfuerzos respecto a su calidad, cantidad y eficiencia. Dentro de esos esfuerzos, tienen un principal protagonismo los sistemas de acondicionamiento electrónico de potencia como son los convertidores CC/CA multinivel.

5. NORMATIVAS. Calidad de Onda

Al establecer las condiciones de conexión a la red pública, se tienen en cuenta su tensión nominal y de funcionamiento, la potencia máxima de cortocircuito admisible, la capacidad de transporte de las líneas, etc., fijándose las condiciones específicas de funcionamiento e interconexión, según las características de la central a conectar [O.M. de 5 de septiembre de 1985].

Estas condiciones son limitaciones en las perturbaciones que pueda transmitir el sistema eólico a la red y especificaciones para el comportamiento del parque eólico, tanto en situación normal, como ante perturbaciones provenientes de la red eléctrica.

El nuevo marco regulatorio del mercado eléctrico impone nuevas restricciones en cuanto a la energía producida por los parques eólicos, así como a las características de la misma. Entre estas destacan las siguientes:

- Ø Control de la reactiva generada por zonas horarias.
- Ø Filtrado de armónicos.
- Ø Control de huecos de tensión.



Actualmente, la mayoría de los aerogeneradores ya instalados carecen de las herramientas adecuadas para garantizar estas nuevas exigencias del mercado, ya sean de obligado cumplimiento, o de carácter opcional.

El nuevo marco regulatorio fija tanto las sanciones y limitaciones por el incumplimiento de aquellas de obligado cumplimiento, así como las primas otorgadas a aquellos promotores que cumplan con las medidas de carácter no obligatorio.

En concreto, como se describen en el apartado 5.1, los parques eólicos han de cumplir las condiciones técnicas para unidades de generación en régimen especial (no-gestionable) y los Procedimientos de Operación del sistema, publicados en el Boletín Oficial del Estado mediante Resolución Ministerial.

Para evaluación del cumplimiento de estas condiciones se pueden estimar los valores de los parámetros a evaluar, mediante dos alternativas: a través de simulación digital o según la Norma Europea EN 61400-21 (apartado 5.2), donde se presenta la evaluación de las características de la calidad de suministro de las turbinas conectadas a red.

5.1 Requerimientos técnicos para la conexión de generación eólica

Red Eléctrica Española establece una serie de condiciones técnicas para productores de energía eléctrica en régimen especial conectados a la red de transporte (220 y 400 kV), clasificados como no-gestionables.

Como producción de energía eléctrica no-gestionable, se definen las unidades de producción en régimen especial (eólicas, solares, etc.), en las que su producción está fuertemente influida por factores físicos no controlables (velocidad de viento, insolación, etc.). Por ello, proporcionan un nivel relativamente bajo de garantía de potencia a lo largo de todo el año. Para estos tipos de producción, se habla de *previsiones de entrega de energía a la red*, en vez de *programas de producción*. De hecho, los desvíos debido a la producción real pueden llegar a ser importantes con una frecuencia de ocurrencia elevada. Si la instalación de régimen especial ha escogido la opción de vender la energía libremente al mercado, las especificaciones son más estrictas para cumplir los requisitos de participación en el mercado.



El nuevo REAL DECRETO 436/2004, de 12 de marzo, establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. En este Real Decreto, en adelante RD, se establecen consideraciones respecto al funcionamiento de los sistemas de generación eléctrica en régimen especial y, en particular, la generación a partir de fuentes de energías renovables. Estas nuevas prestaciones de funcionamiento, que bien son exigidas, o bien bonificadas a propietarios de este tipo de instalaciones, pueden ser implementadas con la ayuda de la tecnología de conversión de potencia actual. Dicha tecnología puede ser aplicada en dos sentidos:

- Adecuando las instalaciones ya existentes, dotándolas de nuevas prestaciones de funcionamiento para que puedan beneficiarse de las bonificaciones establecidas por el RD. Esto se realizaría mediante la inclusión en la instalación de convertidores electrónicos de potencia que permitan lograr los objetivos de funcionamiento establecidos en el RD.
- En segundo lugar, se propone dotar a los nuevos sistemas fabricados en la actualidad para la generación eléctrica en régimen especial de las prestaciones de funcionamiento exigidas en este nuevo RD. Esto se realizaría mediante la introducción de nuevas prestaciones de control y/o sistemas de acondicionamiento electrónico de potencia que permitan desarrollar dichas características de funcionamiento del sistema.

5.1.1 Control de huecos de tensión

Se deberá cumplir lo establecido en las Instrucciones Técnicas Complementarias de calidad del producto en la Red de Transporte, y en la correspondiente normativa de distribución.

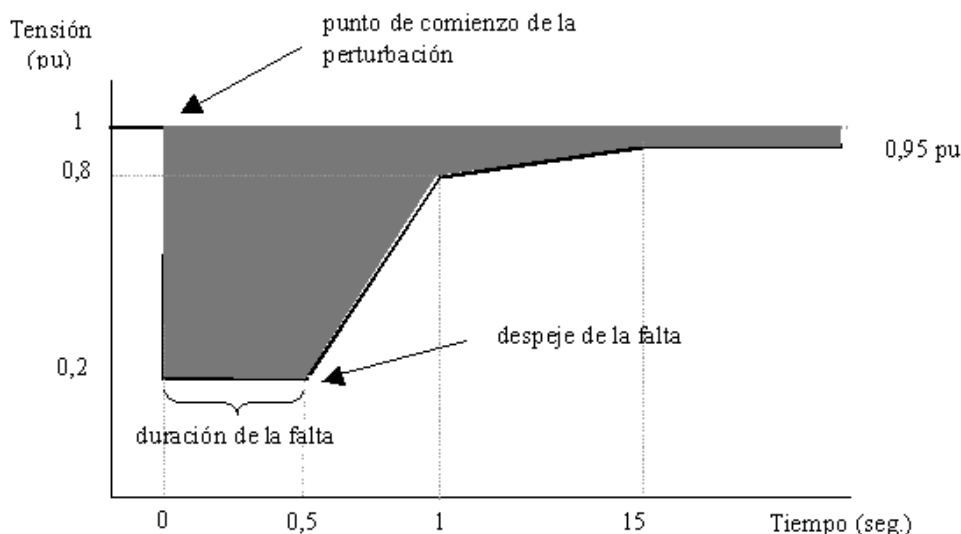


Ilustración 21. Comportamiento durante cortocircuitos

Se tomarán las medidas de diseño y/o control necesarias en las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación del presente documento, para que estos generadores no se desconecten instantáneamente, durante los “huecos de tensión” asociados a cortocircuitos. La instalación (y todos sus componentes) deberá soportar sin desconexión, huecos de tensión trifásicos, bifásicos o monofásicos en el punto de conexión a red, con los perfiles de magnitud y duración indicados en la figura 13.

No es admisible, al nivel de punto de conexión, el consumo de potencia activa durante los periodos de falta y recuperación del Sistema. Se establece una prima de un 5% para aquellas instalaciones que permanezcan conectadas ante la existencia de huecos de tensión.

A título orientativo, las instalaciones de producción se conectarán preferentemente al nivel de tensión que les corresponda, de acuerdo con la potencia total de la instalación de producción, según lo indicado en la tabla siguiente:

Potencia máx. de la instalación (kW)	Nivel de tensión
100	$\leq 1\text{ kV}$
1.000	$1 < \text{kV} \leq 10$
2.000	$10 < \text{kV} \leq 12$
3.000	$12 < \text{kV} \leq 15$
4.000	$15 < \text{kV} \leq 20$

6.000	20 < kV =< 25
8.000	25 < kV =< 36
15.000	36 < kV =< 72,5
40.000	72,5 < kV =< 132
>40.000	132 > kV

Tabla 9. Nivel de tensión-potencia máxima

Las instalaciones conectadas a la Red de Distribución recibirán una bonificación en función de su factor de potencia y de la situación de punta, llano o valle del sistema, según la tabla 10,

Factor de potencia	Energía activa y reactiva horaria	Bonificación horaria % (*)		
	Factor de potencia	Punta	Llano	Valle
Inductivo	< 0.95	0.0	0.0	B ₁
	0.96 a 0.95	0.0	0.0	B ₂
	0.97 a 0.96	0.0	0.0	B ₃
	0.989 a 0.97	0.0	0.0	B ₄
	0.989	0.0	0.0	B ₅
	1.00	0.0	0.0	0.0
Capacitivo	0.989	B ₆	0.0	0.0
	0.989 a 0.97	B ₇	0.0	0.0
	0.97 a 0.96	B ₈	0.0	0.0
	0.96 a 0.95	B ₉	0.0	0.0
	< 0.95	B ₁₀	0.0	0.0

Tabla 10. Bonificación aplicable a instalaciones conectadas a la Red de Distribución por su contribución al control de tensión.

5.1.2 Filtrado de Armónicos

Los flujos de potencia reactiva en la red eléctrica de distribución originan pérdidas y empeora su estabilidad. Por otra parte, la presencia de armónicos provoca calentamiento de los transformadores y molestias a los consumidores cercanos a los puntos donde se generan los armónicos. Los requerimientos más estrictos en la calidad del servicio, que deben proporcionar las compañías eléctricas, obligan a penalizar la energía reactiva, y, en un futuro próximo, el contenido de armónicos.

Uno de los problemas fundamentales, que afrontan las grandes compañías eléctricas, reside en la necesidad de mejorar la calidad en el suministro de energía eléctrica, es decir, la eliminación de potencia reactiva, y perturbaciones de baja frecuencia



(armónicos, flicker, etc.), que son generados por cargas no lineales conectadas a la red eléctrica de distribución. Los circuitos de potencia, que son utilizados en la actualidad para realizar esta misión, se denominan filtros activos de potencia.

Las soluciones convencionales para la cancelación de estas perturbaciones, basadas en elementos pasivos, son inadecuadas. Recientemente, y gracias a la evolución de los semiconductores de potencia, sobre todo el IGBT/IGCT y a las técnicas de control, unido al desarrollo de sistemas microprocesadores muy potentes, hacen que empiecen a utilizar convertidores estáticos actuando como filtros activos de potencia.

En épocas pasadas, este problema no ha tenido la importancia que actualmente empieza a poseer, debido a que cada vez crece más el número de dispositivos electrónicos conectados a la red eléctrica, tales como lámparas de iluminación pública, rectificadores (controlados y no controlados TV), actuadores de motores, etc. Todos estos sistemas provocan una gran cantidad de perturbaciones eléctricas (armónicos, flicker, etc.) y potencia reactiva. La distorsión de tensión producida por los armónicos en corriente ha sido un serio problema en muchos países, que debe ser atajado por las compañías eléctricas, ya que producen calentamientos en los transformadores, sobrecargas, sobretensiones, etc. La presencia de estas cargas electrónicas se da en todos los niveles de potencia desde centenas de VA hasta algunos MVA y, aunque el problema se agrava con la potencia instalada, no es por ello despreciable, el efecto provocado por la acumulación de muchas cargas de pequeña potencia. El problema originado ha adquirido tal importancia que normas como la americana, IEEE-519, y la europea, IEC-555, establecen recomendaciones y niveles admisibles para limitar el contenido o inyección de armónicos en las redes eléctricas. Para su cuantificación se define la distorsión armónica total (THD), que expresa el cociente entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del contenido de armónicos presentes respecto al contenido fundamental.

Las técnicas, tradicionalmente utilizadas en este campo de aplicación, se han basado en la utilización de elementos pasivos. Los filtros pasivos consisten en una serie de condensadores, bobinas y resistencias que forman sistemas para la eliminación de armónicos a la frecuencia de sintonización del filtro. Su problema fundamental radica en el hecho que normalmente las perturbaciones que se producen en la red, son de muy baja frecuencia, debido a lo cual el tamaño y el peso de los componentes reactivos a utilizar son muy grandes, sobre todo, cuando se trata de eliminar este tipo



de perturbaciones en cargas de muy alta potencia, lo cual este tipo de filtro es muy caro y voluminoso.

Por tanto, cada vez es más necesario la introducción en la red eléctrica de distribución de sistemas capaces de realizar la misión de compensar la potencia reactiva y los armónicos en la red.

Teniendo en cuenta la problemática que tenemos en la actualidad respecto a la estabilidad de la red eléctrica y lo que se avecina, en cierto modo, al aumentar considerablemente el número de parques eólicos y/o fotovoltaicos y, además, cada vez, de mayores potencias. En este proyecto, se introduce la utilización de la topología de inversores multinivel para aerogeneradores de grandes potencias, con la finalidad de buscar una solución funcional y óptima a la inyección de armónicos a la red y evitar el flujo de energía reactiva en la red eléctrica.

5.1.3 Control de la reactiva generada

En el RD se bonifica el funcionamiento del aerogenerador, cediendo o absorbiendo energía reactiva de la red de distribución. La capacidad de regulación de reactiva se establece en el RD mediante un factor de potencia comprendido entre -0,95 y 0,95. Por lo cual, si el operador del sistema comanda una referencia de reactiva en este rango, y, además, existen condiciones de viento nominal o superior, es necesario desaprovechar una parte de la potencia activa para conseguir ese objetivo.