

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



PROYECTO
FIN DE
CARRERA

ESCUELA
SUPERIOR
DE
INGENIEROS DE
SEVILLA



MEMORIA TÉCNICA
Y
SIMULACIONES

Autor:
JOSÉ de la CRUZ TORRES
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. DESCRIPCIÓN Y PARTES DE UN AEROGENERADOR.....	10
2.1 PRINCIPIOS DE UN AEROGENERADOR	10
2.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA EXTRAÍBLE CON UN AEROGENERADOR EN UN EMPLAZAMIENTO.	15
2.3 PARTES DE UN AEROGENERADOR	16
2.3.1 Palas	17
2.3.2 Buje	20
2.3.3 Eje principal de baja velocidad.....	21
2.3.4 Eje de alta velocidad	21
2.3.5 Generador eléctrico.....	21
2.3.6 Controlador electrónico de orientación	26
2.3.7 Torre y cimentación	27
3. SISTEMA ELECTRÓNICO DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA.....	29
3.1 RECTIFICADORES TRIFÁSICOS	30
3.3 INVERSORES TRIFÁSICOS	33
4. CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL	34



4.1 TOPOLOGÍA.....	37
<u>4.1.1 Convertidor con fijación por diodos (Diode-Clamped Converter)</u>	38
<u>4.1.2 Convertidor con capacidades flotantes (Flying-Capacitor Converter)</u>	42
<u>4.1.3 Convertidor con conexión en cascada de puentes monofásicos (Cascaded Full-Bridge Converter)</u>	45
4.2 COMPARACIÓN ENTRE TOPOLOGÍAS	50
4.3 ESTRATEGIAS DE CONMUTACIÓN MULTINIVEL	50
4.3.1 Método de modulación PWM senoidal.....	51
4.3.2 Método de modulación SVM vectorial	55
4.3.3 Método de modulación por control de vectores.....	58
4.3.4 Método de modulación por cancelación selectiva de armónicos	59
4.4 EJEMPLOS DE CONVERTIDORES CC/CA TRINIVEL COMERCIALES	61
4.4.1 Modelo ACS 1000 de ABB	61
4.4.2 Modelo Simovert MV de Siemens	62
5. EQUILIBRADO DE TENSIONES DEL PUNTO MEDIO DE CONVERTIDORES MULTINIVEL DCM	63
6. MODELADOS DEL SISTEMA	69
6.1 MODELADO DEL AEROGENERADOR DE DOS NIVELES.....	70
6.2 MODELADO DEL GENERADOR ELÉCTRICO EÓLICO	78
6.2.1 Introducción	78
6.2.2 Módulo mecánico eólico	81
6.2.2 Generador de inducción auto-excitado	82
6.3 MODELADO DEL CONVERTIDOR CC/CA MULTINIVEL (TRINIVEL)	84
6.4 MODELADO DEL SISTEMA COMPLETO	86
7. SIMULACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	89



7.1 SIMULACIONES DEL AEROGENERADOR DE DOS NIVELES	89
7.2 SIMULACIONES DEL GENERADOR ELÉCTRICO DE INDUCCIÓN	92
7.3 SIMULACIONES DEL INVERSOR TRINIVEL NPC	95
7.4 SIMULACIONES DEL SISTEMA COMPLETO	99
7.5 COMPARACIÓN CON INVERSOR PWM DE DOS NIVELES E INVERSOR MULTINIVEL.....	106
8. ALGORITMOS DE MODULACIÓN EMPLEADOS	108
8.1 ALGORITMO DEL MÓDULO MECÁNICO EÓLICO	108
8.2 ALGORITMO DE CONTROL DEL INVERSOR TRINIVEL.....	113
9. CONCLUSIONES Y BENEFICIOS POTENCIALES	136
ANEXO I (ENGLISH)	139
ENTORNO DE SIMULACIÓN PSCAD/EMTDC	139
1. INTRODUCTION PSCAD/EMTDC SOFTWARE.....	140
2. TOOLS USING ON PSCAD/EMTDC.....	141

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha surgido del interés del realizador por la ingeniería, la tecnología electrónica en todas sus variedades y las energías renovables respectivamente.

En este apartado aprovecho la oportunidad para agradecer los múltiples apoyos que he recibido a lo largo de la realización del presente proyecto.

Inicio los agradecimientos haciendo gran mención a mi familia (con su perseverancia he tenido las fuerzas necesarias para concluirlo), y a excelentes personas como M^a Ángeles Martín Prats, tutora y promotora de la creación del presente proyecto, la cuál depositó su confianza y conocimientos de investigación en mi para la realización del mismo, Ramón Portillo Guisado debido a sus consejos y conocimientos del entorno de simulación PSCAD, M^a del Carmen Arco Fuentes por su relación actual como mi coordinadora en el trabajo diario, por tanto, por motivos tan importantes como sus enseñanzas en el entorno de simulación PSCAD, documentación y superación en la realización y finalización de proyectos, y Francisco Javier Márquez Fernández por sus apoyos, conocimientos en modelados y simulaciones del presente proyecto.

En este proyecto no me quiero olvidar de nadie, de este modo, agradezco el apoyo a todas aquellas personas que han estado a mi lado y me han ofrecido su apoyo para la realización y conclusión del presente proyecto.

Gracias a tod@s.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Ilustración 1. Curva de potencia del viento
- Ilustración 2. Curvas C_p según el tipo de aerogenerador
- Ilustración 3. Relaciones de potencia generada
- Ilustración 4. Curva Potencia-Velocidad del viento
- Ilustración 5. Partes de un aerogenerador
- Ilustración 6. Aerodinámica de las palas
- Ilustración 7. Composición de velocidades que inciden sobre un segmento de pala y fuerzas aerodinámicas
- Ilustración 8. Generador asíncrono de jaula de ardilla
- Ilustración 9. Tamaño del rotor según la potencia a generar
- Ilustración 10. Aerogenerador asíncrono acoplado a la frecuencia de red
- Ilustración 11. Aerogenerador síncrono de velocidad variable
- Ilustración 12. Aerogenerador asíncrono de velocidad variable
- Ilustración 13. Campo de torres de aerogeneradores
- Ilustración 14. Gráfica de la velocidad del viento-altura sobre el terreno
- Ilustración 15. Flujo esquemático de partes de un aerogenerador
- Ilustración 16. Topología back-to-back
- Ilustración 17. Rectificador trifásico no-controlado
- Ilustración 18. Rectificación no-controlada
- Ilustración 19. Puente rectificador trifásico controlado
- Ilustración 20. Inversor trifásico de dos niveles
- Ilustración 21. Esquema de topologías de convertidores CC/CA multinivel
- Ilustración 22. Esquema general inversor trinivel NPC.
- Ilustración 23. Esquema de Inversor Acoplado por Diodo de Cinco Niveles.
- Ilustración 24. Esquema Inversor Acoplado por Condensador. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles.
- Ilustración 25. Inversor en Cascada Simétrico de dos Etapas.
- Ilustración 26. Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas (a) operando con cinco niveles,
(b) operando con siete niveles
- Ilustración 28. Esquema de estrategias de control multinivel.
- Ilustración 29. Portadoras alternadas en contrafase para 3 y 5 niveles
- Ilustración 30. Portadoras con simetría respecto al eje horizontal
- Ilustración 31. Todas las portadoras en fase para 3 y 5 niveles
- Ilustración 32. Modulación bipolar para un inversor de tres niveles
- Ilustración 33. *PWM_Modificado*. Tensiones de Fase y Línea al añadir un Tercer Armónico de amplitud $\frac{1}{4}$ de la fundamental.
- Ilustración 34. Diagrama de vectores de estado de un inversor de tres niveles
- Ilustración 35. Armónicos de las estrategias PWM y SVM
- Ilustración 36. Modulación por cancelación selectiva de armónicos
- Ilustración 37. Tensión de salida escalonada generalizada a m ángulos de conmutación
- Ilustración 38. Modelo ACS 1000 de ABB refrigerado por aire.
- Ilustración 39. Modelo ACS 1000 de ABB refrigerado por agua.
- Ilustración 40. Modelo Simovert MV de Siemens.
- Ilustración 41. Vectores de estado de conmutación de un convertidor trinivel
- Ilustración 42. Primer sextante plano d-q para un inversor trifásico trinivel
- Ilustración 43. Sentido de flujo de la intensidad I_d



- Ilustración 44. Captura general de un aerogenerador de inyección a red
- Ilustración 45. Captura de simulación del sistema electrónico de dos niveles de un aerogenerador
- Ilustración 46. Relación de potencias para aerogenerador de dos niveles
- Ilustración 47. Control analógico del aerogenerador de dos niveles
- Ilustración 48. Obtención de las señales de disparo PWM
- Ilustración 49. Generación de las señales de conmutación G1 y G2
- Ilustración 50. Control de la corriente demandada por el elevador
- Ilustración 51. Control de corriente por el elevador
- Ilustración 52. FFT y armónicos de las corrientes de salida
- Ilustración 53. Bloques de cálculo de distorsión armónica THD
- Ilustración 54. Curva de una máquina de inducción
- Ilustración 55. Circuito equivalente por fase de una máquina de inducción
- Ilustración 56. Módulo mecánico eólico
- Ilustración 57. Modelo de máquina de inducción del PSCAD
- Ilustración 58. Sistema completo del generador eléctrico eólico
- Ilustración 59. Modelado del inversor trinivel en PSCAD
- Ilustración 60. Captura del control del convertidor CC/CA trinivel
- Ilustración 61. Modelado del sistema completo
- Ilustración 62. Corriente (fase A) de salida real y referencia
- Ilustración 63. Corrientes de salida del inversor 2 niveles
- Ilustración 64. Tensión rectificadora V_o y su rizado
- Ilustración 65. Tensión del DC-LINK (V_{bus}) y su rizado
- Ilustración 66. Armónicos para inversor de 2 niveles
- Ilustración 67. THD del inversor de dos niveles
- Ilustración 68. Perfiles de viento simulados
- Ilustración 69. Velocidad de consigna generada por el módulo mecánico-eólico
- Ilustración 70. Par mecánico del generador de inducción
- Ilustración 71. Generación de potencia según perfiles de viento
- Ilustración 72. Corriente de fase A y referencia del inversor trinivel
- Ilustración 73. Corrientes trifásicas del inversor trinivel
- Ilustración 74. Corriente de fase A II y referencia del inversor trinivel
- Ilustración 75. Corrientes trifásicas II del inversor trinivel
- Ilustración 76. Perfil de viento-Potencia activa generada
- Ilustración 77. Tensión rectificadora no controlada
- Ilustración 78. Seguimiento de corriente por el elevador
- Ilustración 79. Tensión del DC-LINK y tensiones de equilibrado del punto medio
- Ilustración 80. Corriente de salida y referencia
- Ilustración 81. Corrientes de salida del inversor CC/CA trinivel
- Ilustración 82. Armónicos de corriente de salida del sistema
- Ilustración 83. THD de corriente de salida
- Ilustración 84. Comparativa de tensiones de fase a la salida de inversores CC/CA
- Ilustración 85. Comparativa de corrientes trifásicas
- Ilustración 86. Forma de la tensión de salida. a) 2 niveles. b) 3 niveles.
- Ilustración 87. Curvas de eficiencia del convertidor multinivel frente al clásico con PWM.
- Ilustración 88. File Manager software module
- Ilustración 89. The DRAFT module
- Ilustración 90. Some plots of the PSCAD software

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 15
- Tabla 2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 16
- Tabla 3. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 17 (a)
- Tabla 4. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 17 (b)
- Tabla 5. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 18
- Tabla 6. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 19 (a)
- Tabla 7. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 19 (b)
- Tabla 8. Número de niveles de tensión para inversores Simétricos y Asimétricos de diferente número de etapas.
- Tabla 9. Comparación de los requerimientos de componentes de potencia por fase de convertidores multinivel.
- Tabla 10. Reglas de decisión para controlar tensión del punto neutro.
- Tabla 11. Características del generador eólico simulado
- Tabla 12. Velocidades síncronas - n° de polos de la máquina
- Tabla 13. Parámetros de módulo mecánico eólico
- Tabla 14. Parámetros de la máquina de inducción

ÍNDICE DE ECUACIONES

- Ecuación 1. Factor de Utilización
- Ecuación 2. Horas equivalentes
- Ecuación 3. Relación de factor de utilización
- Ecuación 4. Valor rectificado
- Ecuación 5. Tensión de salida
- Ecuación 6. Valor medio rectificado V_o
- Ecuación 7. Tensión entre fase-neutro de la rama A
- Ecuación 8. Tensión Lineal rms
- Ecuación 9. Potencia total en función de la potencia activa y reactiva
- Ecuación 10. Velocidad síncrona nominal de la máquina de inducción
- Ecuación 11. Velocidad síncrona nominal de la máquina de inducción
- Ecuación 12. Velocidad del rotor respecto al deslizamiento
- Ecuación 13. Velocidad de consigna (p.u.) del generador de inducción

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un componente esencial en el estilo de vida moderno, hace funcionar las computadoras, los electrodomésticos, las industrias y negocios y buena parte del transporte. Sin energía barata nuestro estándar de vida sufriría. Pero la generación de energía eléctrica es también una gran generadora de contaminantes y desechos tóxicos. La energía eólica ofrece un modo de satisfacer las necesidades de la economía y el ambiente suministrando una fuente limpia y competitiva de electricidad.

Se conoce como energía eólica al aprovechamiento por el hombre de la energía del viento. La fuente de energía eólica es el viento, o mejor dicho, la energía mecánica que, en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento.

“Es una fuente de energía renovable, es decir, llega de forma continua a la tierra y es inagotable. Además de la energía eólica, entre las distintas fuentes de energías renovables encontramos: la solar, mareomotriz, geotérmica, hidráulica y biomasa”

Durante las primeras décadas del siglo XX, el bajo precio del petróleo permitió gran parte del desarrollo industrial. Sin embargo no pasó mucho tiempo para que esta concepción fuera bruscamente alterada.

Los primeros efectos de una población mundial exponencialmente creciente comenzaron a sentirse con la gran demanda y consumo de bienes, los cuales permitían predecir a corto plazo el inevitable agotamiento de los recursos naturales no renovables.

En 1973 los países de la OPEP anunciaron el primer aumento significativo en el precio internacional del petróleo. Con el correr de los años el precio del kWh ha seguido aumentando y con demasiada frecuencia lo ha hecho en forma drástica. El precio del petróleo ha subido considerablemente y luego ha oscilado, ajustándose al comportamiento dinámico de la oferta y la demanda. Las fuentes de energía renovables comenzaron a ser estudiadas con un renovado interés, ya que su mayor costo de otros tiempos, no lo era ahora debido a los consecutivos incrementos del precio de los combustibles. De estas energías renovables, la eólica en particular, se encuentra en ventajosas condiciones para competir en precio y confiabilidad.

2. DESCRIPCIÓN Y PARTES DE UN AEROGENERADOR.

2.1 Principios de un aerogenerador

Un **aerogenerador** es un generador de electricidad activado por la acción del viento. Un aerogenerador obtiene su potencia convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento.

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su



masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto *más pesado* sea el aire más energía recibirá la turbina. A presión atmosférica normal y a 15°C el aire pesa unos 1,225 kilogramos por metro cúbico, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.

Se distinguen dos grandes categorías de motores eólicos, que difieren por la disposición de su eje: **horizontal** y **vertical**. Los motores eólicos de eje horizontal son los más extendidos; exigen una orientación continua de su eje, que debe mantenerse paralelo a la dirección del viento; sólo en esta posición las aspas o las palas estarán de cara al viento permanentemente. Los pequeños motores eólicos de eje horizontal (gama de potencia de 0,5 a 50 KW) suelen estar equipados con gran número de palas, en cuyo caso pertenecen al tipo americano que son los molinos tradicionales, como el molino de las Baleares (de seis aspas) o el molino griego (de doce aspas). Este tipo de motor eólico tiene la ventaja de que puede funcionar con vientos flojos.

Los grandes motores eólicos de eje horizontal están equipados con hélices de tres o dos palas. Estos molinos de hélices se han beneficiado de los progresos técnicos de la aeronáutica para la realización de palas muy grandes (de hasta 100 m de longitud) y pueden suministrar potencias elevadas: típicamente de 100 KW a varios MW. Sólo funcionan bien cuando soplan vientos de velocidad media o fuerte en cuyo caso ofrecen un excelente rendimiento. Su principal problema es la fatiga mecánica de los



elementos estructurales, que ha desembocado en la rotura de palas en diversos motores eólicos experimentales.

Los motores eólicos de eje vertical son los más antiguos que se utilizaron, sin duda por su sencillez de funcionamiento que no requiere ninguna orientación del eje. Sin



embargo presentan el inconveniente de tener un rendimiento menos elevado que los de eje horizontal. Estaban prácticamente abandonados cuando, durante los años 60, E.U.A. y Canadá pusieron a punto una nueva concepción de los motores eólicos de eje vertical, inventada en 1925 por el ingeniero francés **Darrieus**; se trata de un molino cuyas palas tienen el mismo aspecto que la parte móvil de un batidor de huevos. Los motores eólicos de **Darrieus** serían adecuados para la producción de pequeñas potencias, inferiores a 50 kW.

Centrándonos en los motores eólicos de eje horizontal de tres palas, un aerogenerador típico de 600 kW tiene un diámetro del rotor de 43-44 metros, lo que supone un área del rotor de unos 1.500 metros cuadrados. El área del rotor determina cuanta energía del viento es capaz de capturar una turbina eólica. Dado que el área del rotor aumenta con el cuadrado del diámetro del rotor, una turbina que sea dos veces más grande recibirá $2^2 = 2 \times 2 =$ cuatro veces más energía.

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con relación al cubo (la tercera potencia) de la velocidad media del viento; p.ej., si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía que contenga será $2^3 = 2 \times 2 \times 2 =$ ocho veces mayor.

La figura 1 muestra que con una velocidad del viento de 8 metros por segundo obtenemos una potencia (cantidad de energía por segundo) de 314 W por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor). A 16 m/s obtendremos una potencia ocho veces mayor, esto es, 2.509 W / m².

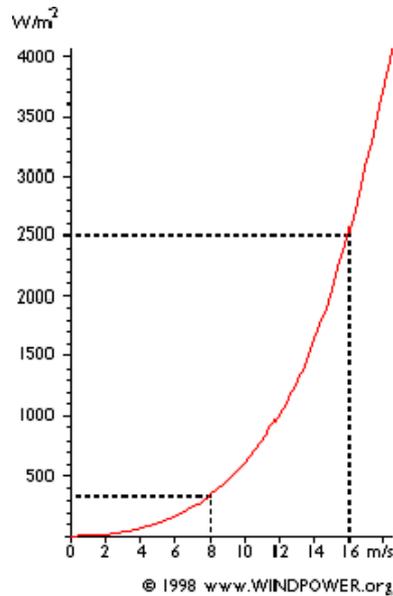


Figura 2.1: curva de potencia del viento

Ilustración 1. Curva de potencia del viento

Todo esto se puede apreciar en la siguiente fórmula:

$$P = 1/2 \rho \pi v^3 r^2$$

Donde:

- **P** = potencia del viento medida en W (vatios).
- **ρ** = densidad del aire seco = 1.225 medida en kg/m³
- **v** = velocidad del viento medida en metros/segundo.
- **r** = radio del rotor medido en metros.

Sin embargo, no toda la energía del viento puede ser transformada en energía mecánica. Como ya se ha comentado, el aerogenerador se mueve debido a la energía cinética contenida en la masa de viento incidente. Aprovechar toda esta energía cinética, supondría dejar el aire parado totalmente una vez hubiera pasado por el aerogenerador.

Esto supondría una retención de la masa aguas debajo de la turbina, e impediría la entrada de más aire, pero esto no es así. El aire incide sobre la turbina y la mueve, y abandona el área barrida por las palas con una cierta velocidad. El hecho de no poder tomar toda la energía del viento ha sido estudiado y tiene un límite superior teórico máximo, llamado **límite de Betz (Cp)**.

La siguiente figura 2 representa el valor $C_p(\lambda)$ para los diferentes tipos de aerogeneradores,

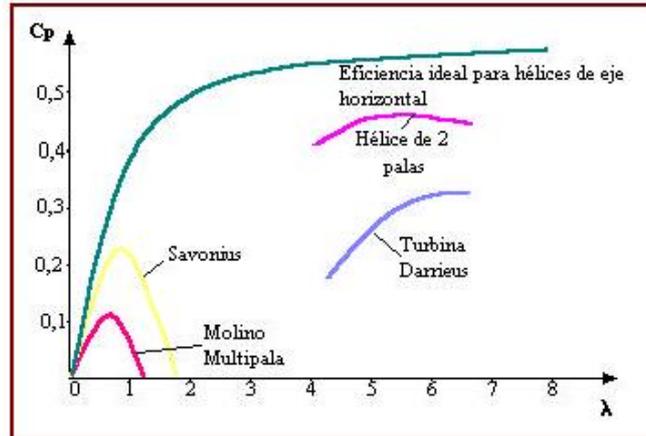


Ilustración 2. Curvas C_p según el tipo de aerogenerador

El factor C_p tiene en cuenta que el área de captación es menor que el de la aeroturbina y que hay una energía cinética residual, asociada a la energía del viento que no puede ser captada como hemos comentado anteriormente. Por tanto, cuanto más frene la aeroturbina a la corriente, menor será la energía cinética residual, pero también será más pequeña el área de captación. Estos dos efectos contrapuestos hacen que C_p tenga un valor máximo $C_p = 16/27$ (límite de Betz). **La ley de Betz** dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán **Albert Betz** en 1919.

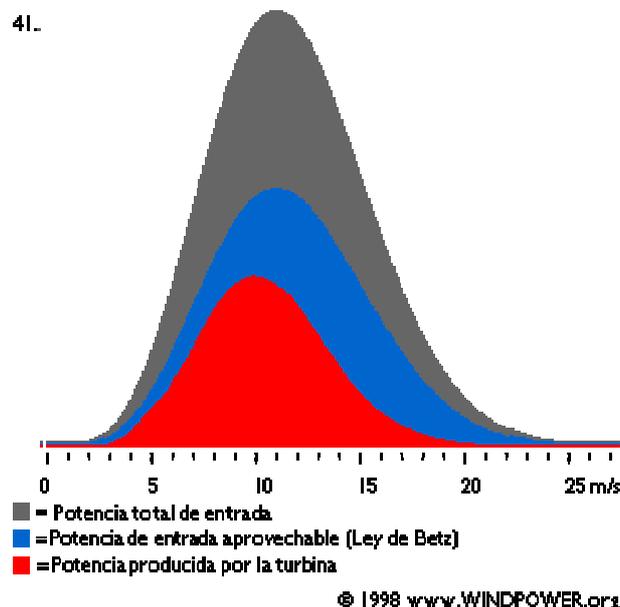


Ilustración 3. Relaciones de potencia generada



La figura 3 muestra la potencia del viento, la extraída por el rotor y la potencia transformada a electricidad. La extraída por el rotor esta limitada por la ley de Betz y la transformada a electricidad esta limitada por la eficiencia del generador.

Como la potencia entregada dada por el generador eólico depende de la velocidad del viento, la eficiencia va ha depender también de la velocidad del viento registrándose eficiencias máximas del orden de 44%.

En la práctica el valor de $C_p(\lambda)$ es menor y para aerogeneradores de un buen diseño oscila entre 0,4 y 0,5.

La aeroturbina en cada lugar de instalación está sometida a vientos de diferente intensidad, y las condiciones de funcionamiento para el máximo coeficiente de potencia antes indicadas corresponden a una velocidad determinada del viento, que depende fundamentalmente del tipo de aeroturbina, tamaño y velocidad de giro. Se puede conseguir un funcionamiento siempre con el máximo coeficiente de potencia si la velocidad de giro variase proporcionalmente al viento incidente; sin embargo, esto presenta una serie de importantes problemas técnicos. La forma habitual de funcionamiento es a velocidad de giro constante o con una variación discreta de la misma, en un reducido número de posibilidades. Bajo estas condiciones, la aeroturbina funciona según indica la figura 4, denominada **curva de potencia**, que da la potencia producida por la máquina para cada velocidad incidente sobre la misma (la curva potencia-velocidad expuesta es para un aerogenerador de 600 kw en un rango de 0-25 m/s).

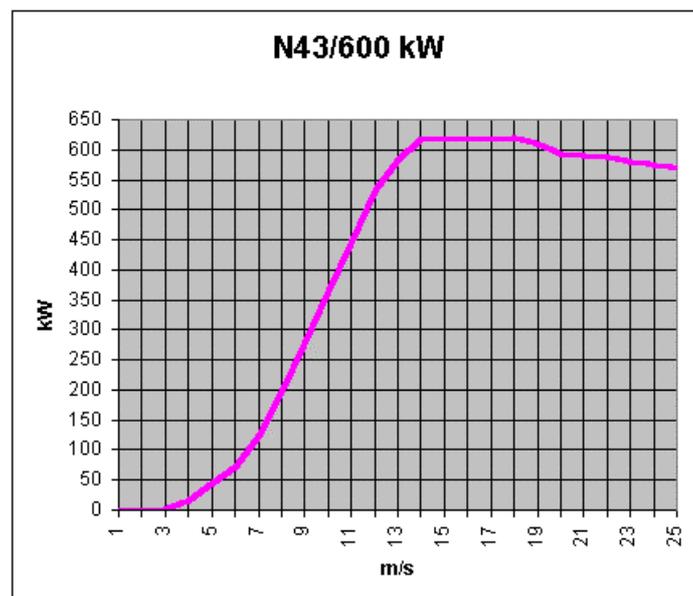


Ilustración 4. Curva Potencia-Velocidad del viento



Se puede observar que hay una velocidad denominada **velocidad de arranque**, por debajo de la cual la aeroturbina no puede producir potencia, y debe estar parada. Si estuviese conectada a la red eléctrica mediante un generador de inducción éste funcionaría como motor y estaría consumiendo energía eléctrica. En el caso de la figura 4, esta velocidad corresponde a unos 3,5 m/s.

Hay otra velocidad, denominada **velocidad nominal**, por encima de la cual se produce una potencia constante, denominada **potencia nominal**. En la figura la velocidad nominal se corresponde con unos 14 m/s y la potencia nominal de 600 KW. Para velocidades mayores que la nominal la potencia producida debe estar limitada, de manera que no exceda la potencia nominal del generador eléctrico. Esta limitación también cumple la función de que las cargas sobre otros componentes de la aeroturbina no exceda de un cierto valor crítico.

2.2 Cálculo de la energía extraíble con un aerogenerador en un emplazamiento.

Si se tiene un aerogenerador aislado, del que se conoce su curva de potencia y también se conoce la curva de duración de velocidad para el lugar donde está emplazado el aerogenerador, a partir de la información contenida en dichas curvas se puede estimar la energía anual que daría la máquina.

Debemos suponer que el aerogenerador está orientado y con un control rápido, de forma que para cada velocidad de viento da la potencia indicada en la figura 4. Si la potencia se da en KW y el tiempo en horas, la energía se daría en KW/h. Una forma usual de expresar dicha energía es mediante el factor de utilización:

$$\text{Factor de utilización} = \frac{\text{Energía anual}}{(\text{Potencia Nominal}) \cdot 8.760 \text{ Horas}}$$

Ecuación 1. Factor de Utilización

Un buen valor del factor de utilización sería mayor que 0,3 y un valor aceptable superior a 0,25. Otra forma alternativa de expresar esta idea es mediante las horas equivalentes que se definen como,

$$\text{Horas Equivalentes} = (\text{Factor de utilización}) \cdot 8.760 \text{ Horas}$$

Ecuación 2. Horas equivalentes



El factor de utilización será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad media del viento del lugar y menor sea la velocidad de diseño de la aeroturbina. Un aerogenerador tendrá tanto más mérito cuanto más baja sea su velocidad nominal para la misma potencia nominal. Obviamente, un lugar será mejor cuanto mayor sea su velocidad media anual. Un valor del factor de utilización de 0,3 se corresponde con una relación,

$$\frac{\textit{Velocidad _ media _ del _ lugar _ anual}}{\textit{Velocidad _ Nominal _ aeroturbina}} = 0,5$$

Ecuación 3. Relación de factor de utilización

El valor de la velocidad nominal de los aerogeneradores oscila entre los 12 y 15 m/s, con lo que para el valor del factor de utilización anterior, se correspondería a valores de la velocidad media del lugar que oscilan entre 6 y 7,5 m/s respectivamente. Sin embargo, estos valores son sólo orientativos, ya que se deberían tener en cuenta otras consideraciones.

Cuando tenemos un parque eólico con muchas máquinas puestas en un terreno no uniforme, hay que tener en cuenta que tanto la dirección como la intensidad del viento no es la misma y puede variar de una máquina a otra. Hay otros efectos más difíciles de cuantificar y que generalmente disminuyen la energía producida, como son las paradas por mantenimiento, la eficiencia eléctrica, el efecto de las heladas, el ensuciamiento de las palas, la histéresis por velocidad alta, el retardo de la respuesta al cambio de orientación, la distorsión de la curva de potencia, etc.

2.3 Partes de un aerogenerador

Una descripción completa de las partes de un aerogenerador de eje horizontal de 3 palas se muestra a continuación:

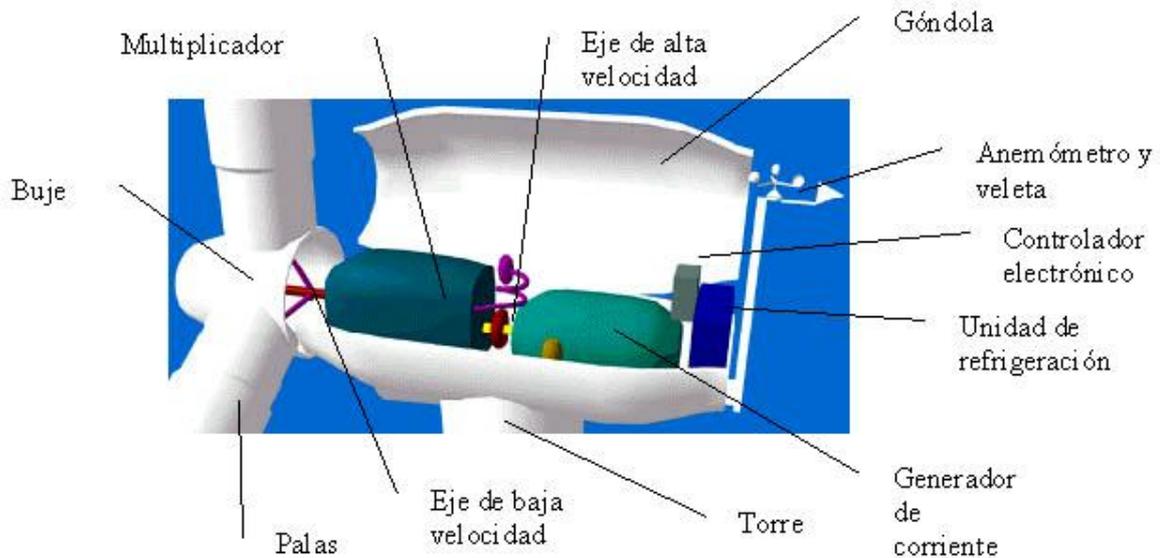


Ilustración 5. Partes de un aerogenerador

Las palas son el elemento fundamental que capta la energía del viento mediante la acción de las fuerzas aerodinámicas. Las palas transmiten su giro a un eje alojado en la góndola, donde está también el generador eléctrico, la caja de cambios, y los mecanismos de control, como podemos apreciar en la figura 5.

La góndola reposa sobre una placa o plataforma, sobre la que gira, cambiando el ángulo de guiñada, con el fin de orientar el aerogenerador, de manera que su eje de giro sea paralelo a la dirección del viento. La plataforma está sobre una torre, que a su vez está unida al suelo mediante un sistema de cimentación apropiado. Los aerogeneradores en los cuales el control es por ángulo de pala, éstas pueden girar alrededor de su eje longitudinal. Al ángulo que forma la pala con el eje longitudinal se le denomina **ángulo de paso**.

A continuación, se va a hacer una breve descripción de los elementos más importantes del aerogenerador:

2.3.1 Palas

Las palas son el elemento más importante del aerogenerador a través del cual se capta la energía. Debe cumplir los siguientes objetivos:

- I. Maximizar la energía obtenida mediante un diseño aerodinámico apropiado.

- II. Ser capaces, mediante un sistema de control adecuado, de limitar la potencia máxima a la nominal de la aeroturbina.
- III. Evitar fenómenos de resonancia y amplificación excesiva de la carga dinámica.
- IV. Resistir las cargas extremas.
- V. Evitar deflexiones excesivas. Las palas son como vigas empotradas en el buje que están sometidas a un importante momento flector en su base, debido fundamentalmente a la componente de la fuerza de tumbado. Dicha fuerza dobla la punta de la pala hacia sotavento y en caso en que el rotor está situado a barlovento de la torre, se ha llegado a producir el accidente en el que las palas peguen contra la torre.
- VI. Minimizar peso y coste sin dejar de tener en cuenta los puntos anteriores.

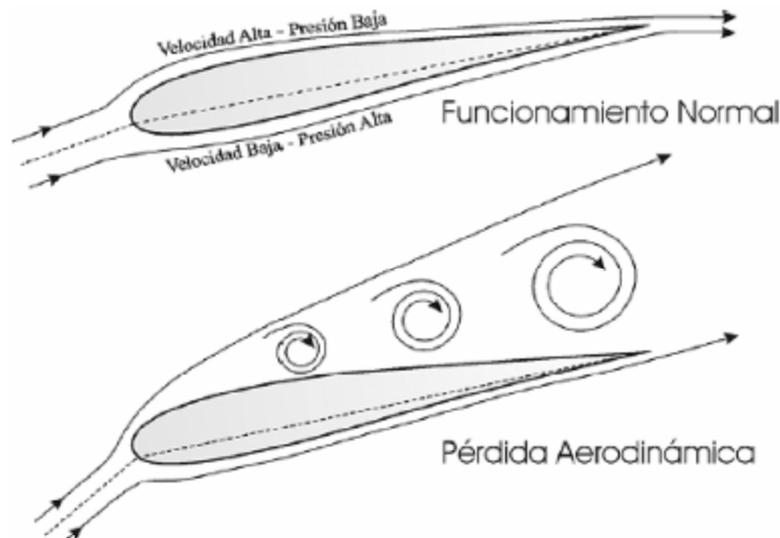


Ilustración 6. Aerodinámica de las palas

Considerando lo anterior se debe atender tanto al diseño aerodinámico, con el que se determina la forma exterior de la pala: tipo de perfiles, tamaño y torsión, como al diseño estructural en el que se fija la forma interior, materiales, sujeciones, etc. El concepto básico del diseño y fabricación de la pala debe ser el de crear una superficie exterior de acuerdo con los requerimientos aerodinámicos y que al mismo tiempo sea robusta, ligera y barata.

La fuerza resultante que se produce sobre cada segmento de pala se descompone en una fuerza T , dirigida en la dirección de rotación, que es la que produce el par motor, y en otra fuerza E , que se traduce en un empuje inútil sobre el eje del rotor.

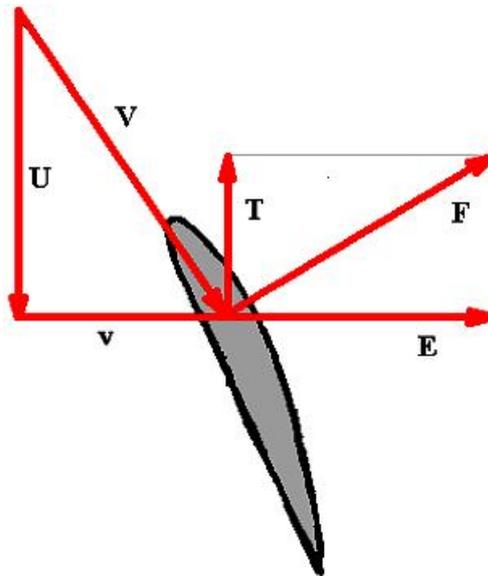


Ilustración 7. Composición de velocidades que inciden sobre un segmento de pala y fuerzas aerodinámicas

Donde:

F = fuerza aerodinámica.

T = fuerza motriz.

E = empuje aerodinámico.

v = velocidad del viento.

V = Velocidad de la corriente.

U = velocidad debida a la rotación.

Si queremos que cada segmento trabaje con un ángulo de ataque óptimo que haga máxima la fuerza motriz T, tendremos que diseñar la pala con diferente ángulo en cada segmento, para compensar la variación en el ángulo de incidencia de la corriente. Esto es la causa de que frecuentemente las palas se construyan con torsión. Sin embargo, a veces es preferible diseñar la pala sin variar el ángulo de cada segmento, para evitar las dificultades de fabricación de una pala con torsión, a pesar de que el rendimiento aerodinámico disminuye.

Hoy en día, las palas suelen estar hechas de materiales compuestos, que tienen una gran resistencia y rigidez en relación con su peso, son resistentes a la corrosión y se utilizan diferentes métodos de fabricación asequibles.

Los materiales compuestos incluyen al menos dos materiales distintos, generalmente fibras depositadas en una matriz que sirven de unión. La fibra más usada suele ser la



de vidrio, aunque también las hay de carbono, pero apenas se usan por ser más caras. Las matrices suelen ser de resinas epoxy o poli-ésteres.

2.3.2 Buje

El buje, como podemos apreciar en la figura 5, es la componente de la turbina que conecta las palas al eje principal, y éste a su vez a la caja de cambios. A través del buje se transmite el par motor al generador, y en general todas las cargas aerodinámicas y el peso de las palas a la góndola, y finalmente a la torre. Esto hace que su cálculo estructural sea relativamente complejo.

El buje puede ser rígido o puede permitir un cierto juego o movimiento relativo de las palas respecto al eje, mediante articulaciones apropiadas. Una opción, denominada en inglés “teetering hub”, es que el conjunto del rotor sea rígido, pero que las articulaciones le permitan formar un ángulo variable con el eje de giro. Esta solución es compleja mecánicamente, pero permite reducir las cargas no permanentes asociadas al movimiento del buje cuando se busca el alineamiento con la dirección del viento, mediante el cambio del ángulo de guiñada. Este tipo de solución se suele usar en aerogeneradores de dos palas porque en aerogenerador de tres palas, la tercera pala suele eliminar las cargas sinusoidales asociadas al movimiento y desalineación del buje. Otra opción denominada en inglés “hinged hub”, permite el movimiento individual de las palas relativo al eje.

En general, para aerogeneradores de tres palas, los bujes suelen ser rígidos para evitar las complicaciones mecánicas.

Si la máquina está controlada por cambio de paso, es decir, controla el ángulo de pala, el buje deberá incorporar unos cojinetes en la raíz de cada pala, que permitan únicamente ese movimiento de cambio de paso, así como el mecanismo correspondiente para poder llevarlo. El ángulo de paso o de pala depende de las condiciones del viento, siendo la velocidad de movimiento de la pala de un 1º por segundo y es mayor cuando el cambio de paso es utilizado como freno aerodinámico del aerogenerador.

2.3.3 Eje principal de baja velocidad

A través de él se transmite el par, y además soporta el peso de las palas, a su vez está soportado por cojinetes que transmiten las cargas a la góndola; existen diversas opciones para la colocación de los cojinetes, así como la conexión a la caja de cambios. En ocasiones, alguno de los cojinetes suele estar integrado dentro de la caja de cambios.

A veces, la conexión a la caja de cambios se suele hacer usando un acoplamiento hidráulico que permita un cierto deslizamiento y amortigüe las fluctuaciones del par.

La finalidad de la caja de cambios es aumentar la velocidad de giro para poder conectar la aeroturbina a la red eléctrica. Es una de las partes más pesada y problemática de los aerogeneradores. Las cargas más importantes que debe soportar son las transmitidas desde las palas a través del buje y eje. Muchas de estas cargas fluctúan de forma importante debido a las turbulencias del viento, y dan lugar al desgaste de los dientes de los engranajes, de los cojinetes, y de los cierres y sellado del aceite. Finalmente, la caja de cambios es una fuente importante de ruido del aerogenerador, aunque en la actualidad se ha reducido de forma considerable.

2.3.4 Eje de alta velocidad

Conecta la caja de cambios con el generador eléctrico, bien directamente o, como antiguamente, a través de una correa de transmisión.

2.3.5 Generador eléctrico

Entendiendo un aerogenerador como una máquina de generar energía eléctrica, es de interés clasificar los aerogeneradores atendiendo al tipo de generador eléctrico. Más adelante se analizarán las diferentes tecnologías que se aplican actualmente como sistemas de generación eléctrica de aerogeneradores. Hoy en día, según el sistema empleado, la máquina eléctrica utilizada como generador puede tratarse de:

- I. Generador asíncrono de jaula de ardilla, o de rotor bobinado.

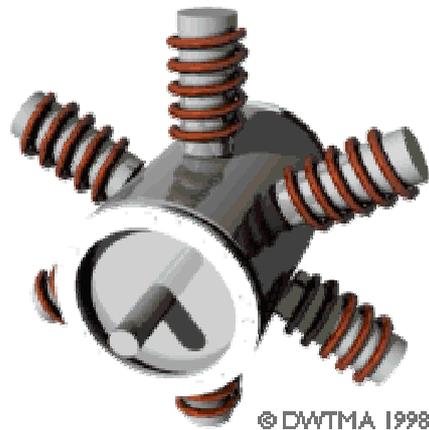


Ilustración 8. Generador asíncrono de jaula de ardilla

El generador asíncrono es robusto y está compuesto por un bobinado trifásico inductor conectado a la red eléctrica y ubicado en el núcleo magnético del estator, y de un sencillo bobinado inducido, cortocircuitado, y ubicado en el rotor de la máquina.

II. Generador síncrono con bobinado de excitación, o de imanes permanentes.

El generador síncrono está compuesto por un bobinado trifásico conectado a la red eléctrica y ubicado en el núcleo magnético del estator que constituye el inducido de la máquina, contrariamente a lo que ocurría en un generador asíncrono. Por el contrario, el rotor dispone de un bobinado de corriente continua, que, mediante un circuito de autoexcitación, puede ser regulado desde el exterior, que constituye el sistema inductor de la máquina y, por tanto, donde se puede regular el nivel de magnetización en función del grado de carga.

La siguiente figura 9 da una idea de los tamaños de rotor normales en los aerogeneradores. Por ejemplo, una turbina con un generador eléctrico de 2 MW suele tener un rotor de unos 64 m. Si se dobla el diámetro del rotor, se obtendrá un área cuatro veces mayor. Esto significa que también obtendrá del rotor una potencia disponible cuatro veces mayor.

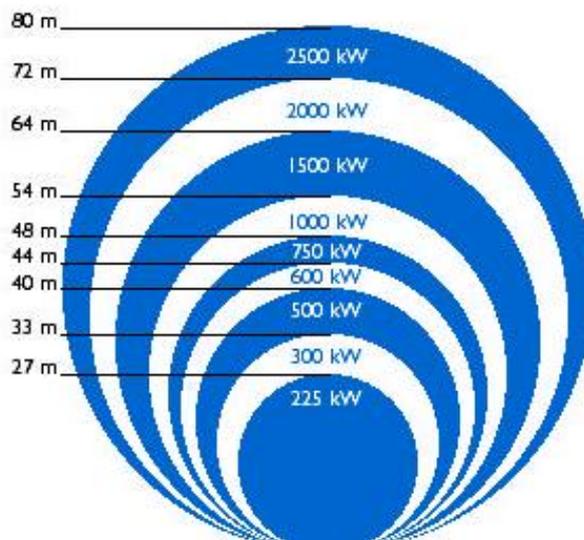


Ilustración 9. Tamaño del rotor según la potencia a generar

Tanto uno como otro, presentan una serie de características ventajosas o de ciertos inconvenientes, pero tanto el aerogenerador asíncrono como el síncrono se utilizan en sistemas pertenecientes a la clase de “aerogeneradores de velocidad variable, desacoplados de la frecuencia de red mediante convertidores electrónicos” y es este caso el que tiene gran interés en este proyecto.

Por ello, se presenta ahora una clasificación de aerogeneradores en dos grupos atendiendo a que su sistema de generación eléctrica admita o no la posibilidad de modificar su frecuencia de generación respecto a la frecuencia de la red a la que están conectados, permitiendo, por tanto modificar su velocidad:

I. Aerogeneradores directamente acoplados a la frecuencia de red.

En estos sistemas la velocidad del eje es constante y viene impuesta por la frecuencia de la red con un muy pequeño margen de deslizamiento (1-2%), cualquiera que sea la velocidad del viento incidente.

Por una parte, la imposibilidad de variar la velocidad en un amplio margen, hace difícil almacenar en el sistema de masas inerciales rotativas, el exceso o defecto de energía procedente de ráfagas de viento transitorias de gran pendiente, así como oscilaciones de par aerodinámico, y permitir así amortiguar su efecto perturbador sobre el par transmitido y en la potencia eléctrica entregada a la red. Esto tiene un efecto especialmente severo de fatiga sobre los engranajes de transmisión de la caja de



cambios, y este efecto se puede aliviar utilizando un generador de inducción, ya que permite un ligero deslizamiento especialmente a altas velocidades del viento.

Por otro lado, en los sistemas de generación que disponen únicamente de una máquina de inducción directamente acoplada a la red, sin la inclusión de un convertidor electrónico, no es posible lograr el control sobre el par electromagnético, ni sobre la potencia reactiva entregada que posibilite participar al aerogenerador en la estabilidad de la red a la que está conectada.

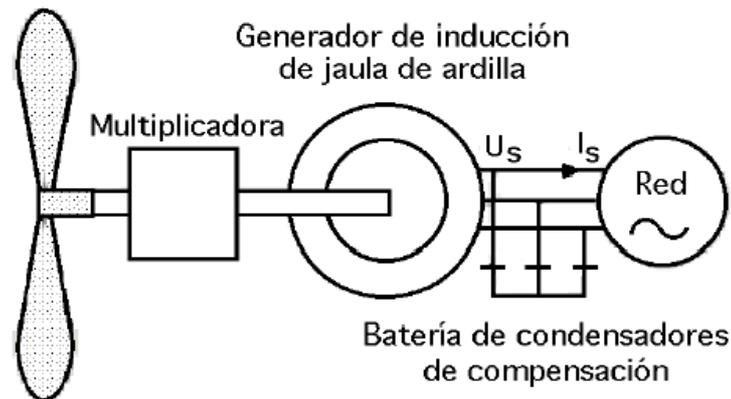


Ilustración 10. Aerogenerador asíncrono acoplado a la frecuencia de red

II. Aerogeneradores de velocidad variable, desacoplados de la frecuencia de red mediante convertidores electrónicos.

Estos generadores utilizan un sistema que dispone de un convertidor electrónico que desacopla la frecuencia de la red de la frecuencia del aerogenerador, y por tanto, permite variar la velocidad del eje. Esto permite realizar un control sobre el exceso o defecto de energía de oscilaciones del viento comentado anteriormente, y de esta forma reduce la fatiga de los engranajes de transmisión.

También permiten una regulación independiente sobre la potencia activa y reactiva, tanto en régimen permanente como durante transitorios eléctricos, ayudando así a la estabilidad de la red.

Los dos grandes inconvenientes que presentan estos sistemas es que añaden un factor de pérdidas al conjunto, derivado de la inclusión del convertidor, e introducen cierta distorsión armónica en las corrientes inyectadas en las red. Como veremos más

adelante, la utilización de sistemas con convertidores CC/CA multinivel hacen de este inconveniente una desventaja menor y de fácil eliminación.

Principalmente hay dos configuraciones de esta clase de sistemas:

A. Generador síncrono de velocidad variable.

Este sistema está compuesto por una máquina síncrona, que puede ser de excitación por imanes permanentes o bobinado inductor, conectado a la red a través de un convertidor que debe estar dimensionado a una potencia superior a la del aerogenerador.

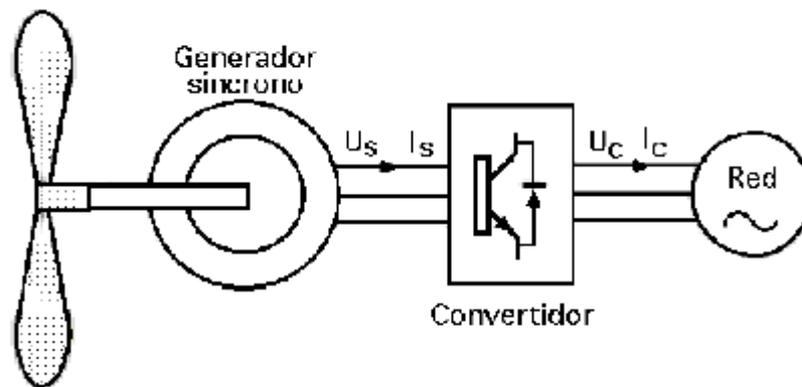


Ilustración 11. Aerogenerador síncrono de velocidad variable

B. Generador asíncrono de velocidad variable doblemente alimentado.

Este sistema está compuesto por un generador asíncrono de rotor bobinado, donde el estator está conectado directamente a la red y el rotor a través de unos anillos deslizantes y de un convertidor de frecuencia de potencia reducida (generalmente el 10% de la potencia del aerogenerador). Este sistema es más económico aunque el margen de variación de velocidad es más reducido (40-50%)

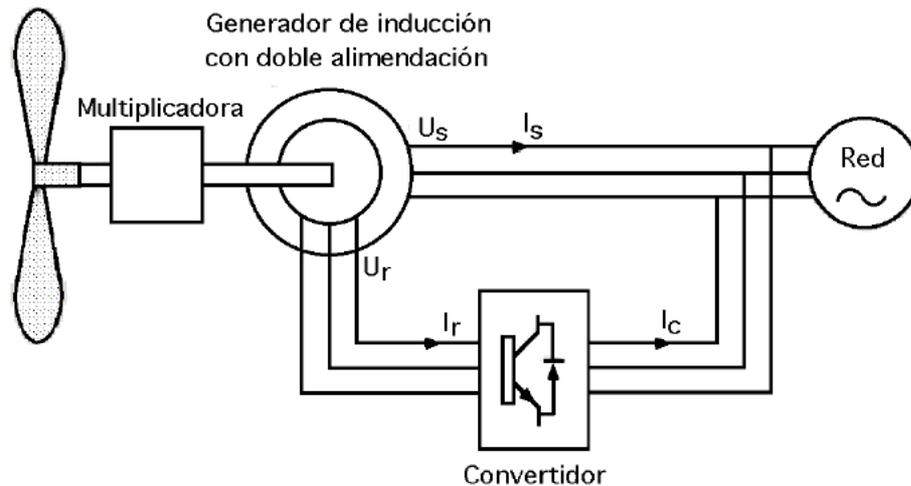


Ilustración 12. Aerogenerador asíncrono de velocidad variable

2.3.6 Controlador electrónico de orientación

El controlador de la turbina eólica consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, el controlador también controla un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina.

Una de las aplicaciones del controlador electrónico es el control en cada momento de la orientación de la turbina eólica, o más concretamente del Buje. Con ello consigue alinear correctamente, y en dirección perpendicular al viento, las palas de la turbina, consiguiendo por tanto una mayor captación del viento sea cual sea su dirección durante las horas de funcionamiento.

Motores de giro. En las turbinas eólicas grandes, es necesario un mecanismo que posicione la turbina enfrente al viento. Este movimiento circular, se consigue con unos motores y reductores fijos a la góndola, y engranando en un dentado de la parte superior de la torre, llamada corona de orientación. La señal de posicionamiento correcta la recibe del controlador de la turbina, con las lecturas de la veleta y anemómetro instaladas en cada turbina.

Freno en orientación. Tienen como misión evitar desplazamientos radiales de la góndola, por efecto del viento incidente o giro del rotor, no deseados. Asimismo,



reducen el desgaste de los engranajes de orientación. Su accionamiento puede ser hidráulico o eléctrico, actuando en pinzas de freno o motor eléctrico respectivamente.

2.3.7 Torre y cimentación

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.)

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.



Ilustración 13. Campo de torres de aerogeneradores

Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20 por ciento del coste total de la turbina. Para una torre de unos 50 metros, el coste adicional de otros 10 metros es de unos 12.000 €. Por lo tanto, es bastante importante para el coste final de la energía construir las torres de la forma más óptima posible

Las palas de rotor de turbinas con torres relativamente cortas estarán sometidas a velocidades de viento muy diferentes (y, por lo tanto, a diferente flexión) cuando la



pala se encuentre en su posición más elevada y en su posición más baja, lo que provoca un aumento de las cargas de fatiga en la turbina. Generalmente, es una ventaja disponer de una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del suelo.

En la figura 14 se muestra una curva exponencial entre la velocidad del viento respecto a la altura sobre el suelo.

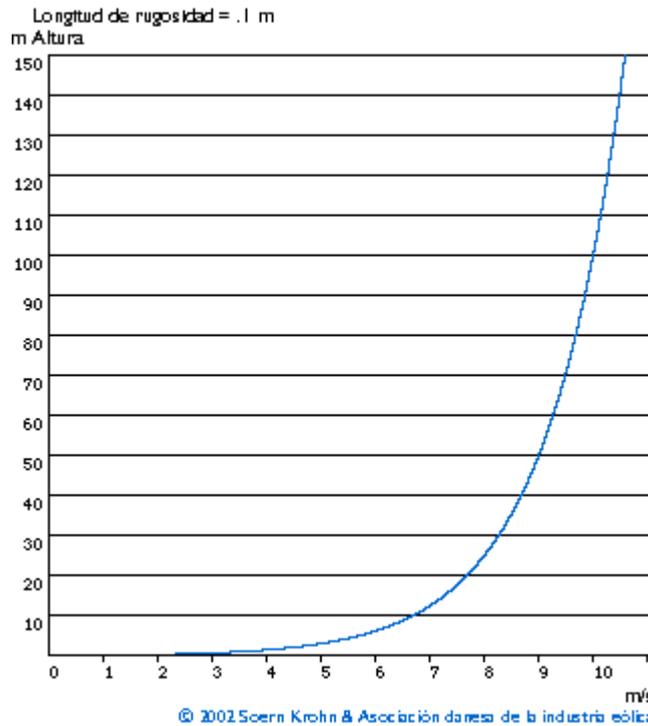


Ilustración 14. Gráfica de la velocidad del viento-altura sobre el terreno

Una vez visto todas las partes importantes que constituyen los aerogeneradores, podemos comentar que la configuración de un sistema eólico no es fácil, siendo la opción más acertada aquella que se aproxime más a la finalidad del sistema. La siguiente figura 15 muestra el mapa de conversión de energía mecánica a energía eléctrica, y como se ha explicado anteriormente, son varias las diferentes configuraciones posibles.

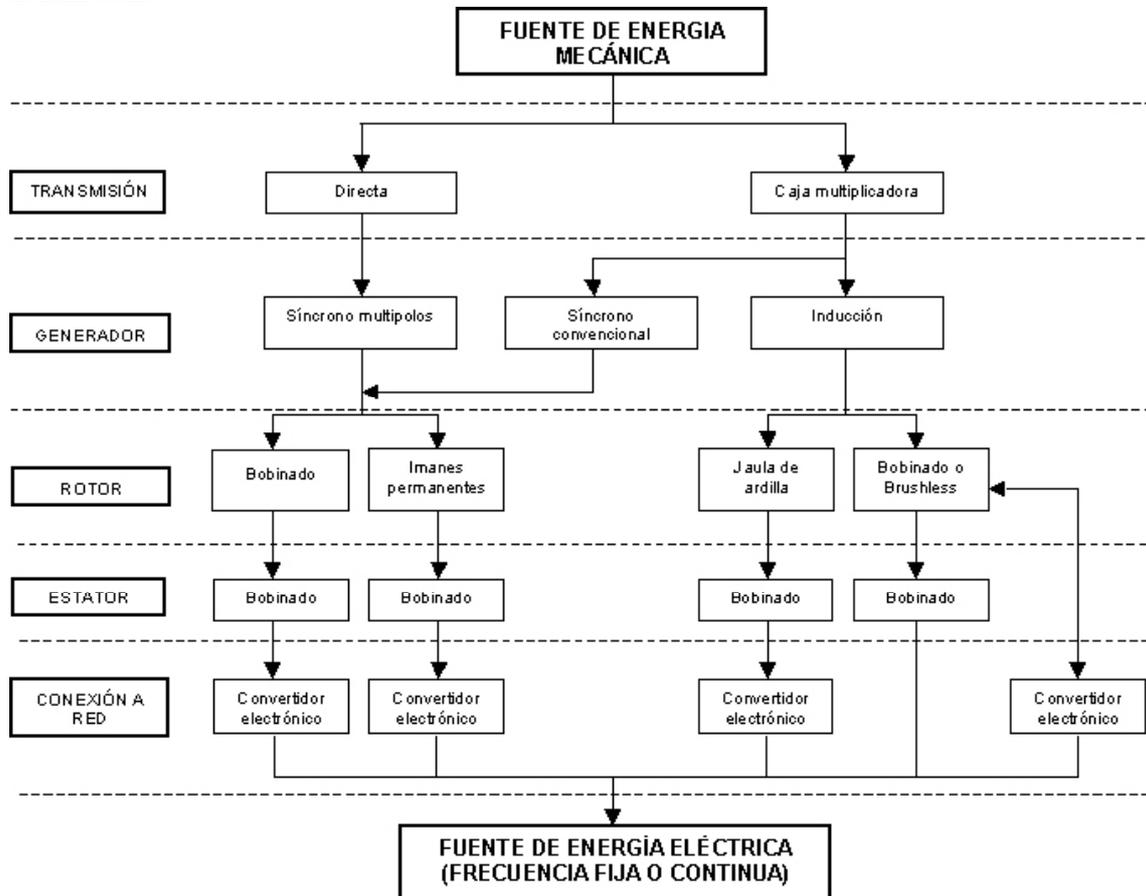


Ilustración 15. Flujo esquemático de partes de un aerogenerador

3. SISTEMA ELECTRÓNICO DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

Una vez visto y descrito todas las partes importantes que forman un sistema eólico, es decir, un aerogenerador, este proyecto se centra en la parte del sistema electrónico de acondicionamiento de potencia, dejando a un lado otras partes importantes en el diseño del aerogenerador como son la mecánica, aerodinámica, funcional y económica, y otras partes no menos importantes como la localización y su impacto medioambiental.

Centrándonos ya en la parte que concierne al presente proyecto, la parte de electrónica, y que por supuesto no deja también de ser importante en el conjunto del aerogenerador, vamos a realizar los diferentes estudios a la topología del sistema de acondicionamiento de potencia. Como propiamente su nombre indica, este sistema electrónico realiza las funciones de acondicionar, convertir o adaptar la potencia que

genera la parte mecánica del aerogenerador, seguida por la conversión a potencia eléctrica del generador eléctrico, en potencia eléctrica generada con las características adecuadas para la inyección de dicha potencia en red y su posterior consumo según el cumplimiento de las normativas estatales vigentes.

Como ya se ha comentado anteriormente en esta memoria técnica y también en la memoria justificativa del presente proyecto, el incremento exponencial de la demanda de potencia eléctrica junto con una mayor imposición de una adecuada calidad de onda hacia el consumo final del cliente, hace que cada vez los sistemas eólicos sean de mayor potencia y a su vez mejoren en la calidad de potencia eléctrica que inyectan a la red para la conservación de la estabilidad de dicha red.

Actualmente, con la rápida evolución de los componentes electrónicos de potencia y la tecnología eólica, se tiende a sistemas de acondicionamiento de potencia que ayuden a la estabilidad de la red, al consumo de reactiva y a una contribución de potencia constante.

En este proyecto, y en este apartado en particular, se va a describir la topología más utilizada en la actualidad en sistemas de acondicionamiento de potencia eólicos, denominada topología Back-to-Back:

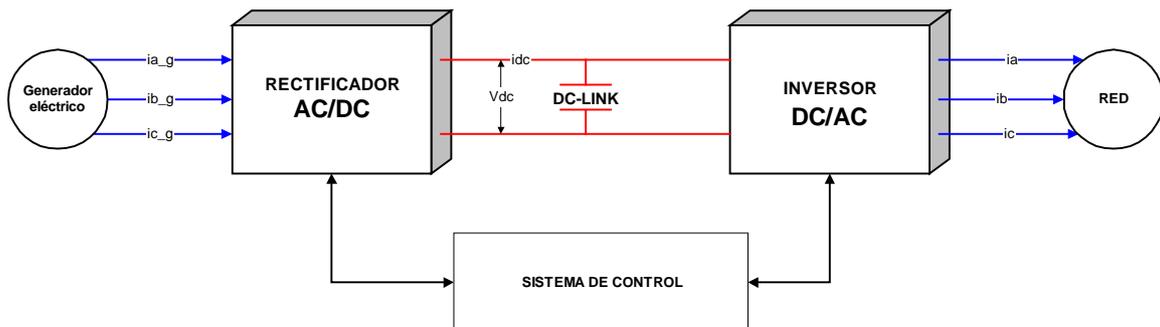


Ilustración 16. Topología back-to-back

A continuación se hace una breve descripción del comportamiento y funcionalidad de cada una de las partes de la topología back-to-back:

3.1 Rectificadores trifásicos

La conversión AC/DC se puede realizar usando la metodología convencional de un rectificador no-controlado, con un semi-controlado y con un rectificador controlado. Un

rectificador no-controlado básicamente usa 6 diodos como interruptores. Por otra parte, el rectificador controlado, como el nombre sugiere, usa 6 interruptores de potencia controlables como Thyristors, GTOs, IGBTs, o IGCTs. El diagrama de circuito típico para un rectificador de diodos está en la Figura 17. La fuente de entrada senoidal AC es alimentada en el rectificador de diodo de puente completo como se muestra en la figura 17 (terminales R, S y T e inductancias parásitas L_s). La mitad superior del puente lleno, sólo los diodos con su ánodo en el potencial más alto conducirán. Del mismo modo, la mitad inferior del puente completo, sólo los diodos con su cátodo en el potencial más bajo conducirán.

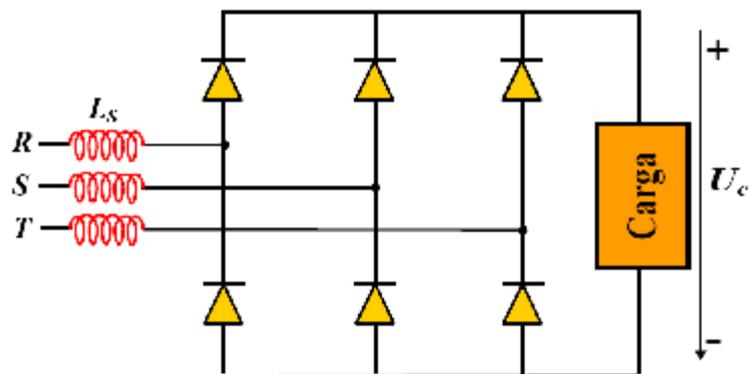


Ilustración 17. Rectificador trifásico no-controlado

Teniendo en cuenta la siguiente figura sobre la rectificación no-controlada:

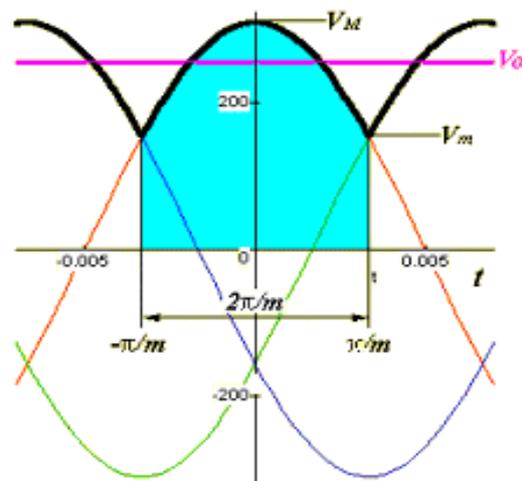


Ilustración 18. Rectificación no-controlada

De la figura 18 podemos deducir que,

$$V_m = V_M \cdot \cos\left(\frac{p}{m}\right)$$

Ecuación 4. Valor rectificado

La tensión de salida estará formada por una serie de arcos que se repiten periódicamente:

$$U_C = V_M \cdot \cos(w \cdot t)$$

Ecuación 5. Tensión de salida

para $-\pi/m < wt < \pi/m$,

El valor medio V_o se obtiene integrando entre los límites anteriores,

$$V_o = \frac{m}{p} \cdot V_M \cdot \text{sen} \cdot \left(\frac{p}{m}\right)$$

Ecuación 6. Valor medio rectificado V_o

Los convertidores trifásicos controlados se utilizan normalmente en aplicaciones de alta potencia, con la gran ventaja de tener control sobre los dispositivos, la demanda de corriente y el bus de continua. La figura muestra la topología de un convertidor AC/DC VSI trifásico en puente completo para el presente proyecto:

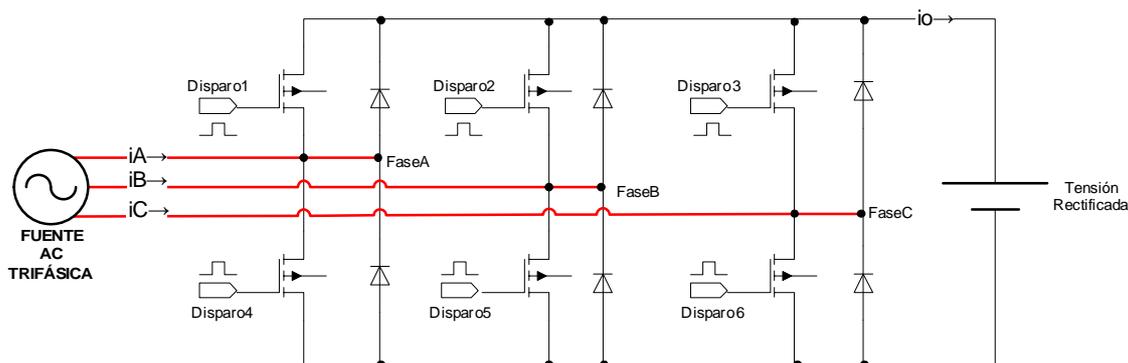


Ilustración 19. Puente rectificador trifásico controlado

En la figura 19 se puede apreciar que la funcionalidad de este sistema es que a partir de una fuente de potencia trifásica obtenemos una tensión rectificada a la salida, y como ya se ha comentado anteriormente, este sistema tiene la gran ventaja del control de la tensión rectificada de salida, siendo los interruptores (IGBTs o IGCTs) los que

controlan la demanda de corriente de la fuente AC trifásica para mantener la tensión rectificadora de salida al valor predeterminado.

Este convertidor AC/DC controlado respecto a otros no controlados tiene la ventaja de controlar la potencia trifásica inyectada en el sistema tomando la corriente a la frecuencia de entrada en fase con la tensión y sin generar distorsión armónica THD de corriente.

Una vez que controlamos la tensión rectificadora de salida tenemos que tener en cuenta el valor máximo que se puede obtener según la fuente de potencia AC. El valor nominal en RMS es V_{ac} entre fase y neutro de la fuente AC por tanto se puede rectificar hasta una tensión máxima de,

$$V_{DC} = (3 \cdot \sqrt{3} / \pi) \cdot V_{ac}$$

3.3 Inversores trifásicos

La operación de un inversor trifásico es bastante similar a la vista en el rectificador trifásico. El modelo de señal de disparo PWM de los semiconductores es obtenida por la diferencia entre la señal de frecuencia portadora (triangular) y la señal senoidal de referencia con índice de modulación (m_a). Se muestra la topología del inversor trifásico de dos niveles,

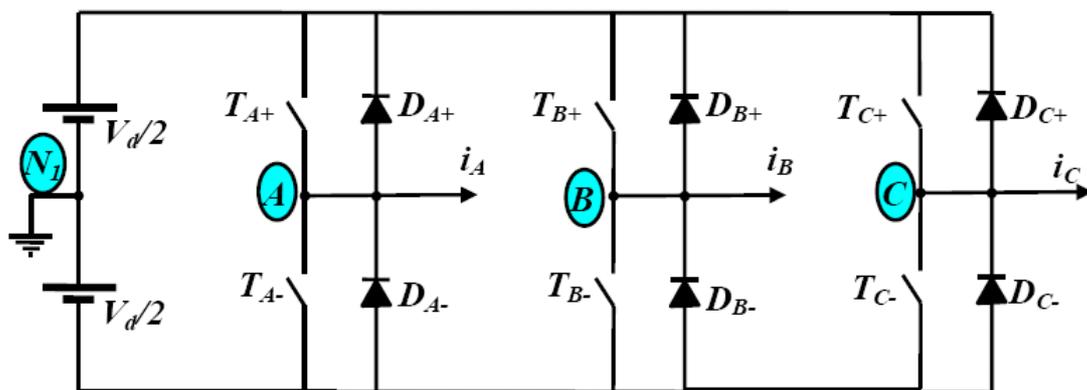


Ilustración 20. Inversor trifásico de dos niveles

En la rama de la fase a, cuando el IGBT superior conduce, el de más abajo IGBT no deberían conducir y viceversa. Esto es aplicable a las otras fases B y C del inversor.



La proporción de modulación usada en este proyecto es $m_a < 1$ (que está sobre la región lineal de m_a).

En este caso, el valor máximo del componente de frecuencia fundamental en una de la rama de inversor es,

$$V_{AN1} = m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Ecuación 7. Tensión entre fase-neutro de la rama A

Usando el álgebra simple, el valor de rms de la componente de la frecuencia fundamental de tensión de línea-a-línea es,

$$V_{Lineal(rms)} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Ecuación 8. Tensión Lineal rms

Aunque en este proyecto se ha descrito las topologías, funcionamiento y modulaciones de los inversores trifásicos de dos niveles, a continuación se hace un estudio de las topologías y estrategias de control de los inversores multinivel que son la parte a tratar en el presente proyecto.

4. CONVERTIDORES CC/CA MULTINIVEL

Los convertidores multinivel se han consolidado en los últimos años como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Se puede evidenciar un incremento significativo en el número de aplicaciones donde la conversión de energía se realiza con convertidores multinivel.

La conversión multinivel puede considerarse un área joven en el entorno de la conversión de energía, presentando unas expectativas que hacen pensar en un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro.

Como ya se ha definido en la memoria justificativa del presente proyecto, la forma más general de entender los convertidores CC/CA multinivel consiste en considerarlos como sintetizadores de tensión. La tensión alterna de salida, de valor elevado, se



sintetiza a partir de diferentes niveles de tensión continua de entrada, de valor más pequeño, accionando apropiadamente los interruptores del convertidor. Esta es la diferencia básica respecto a un convertidor CC/CA convencional, donde la tensión de entrada presenta un único nivel.

Veamos que ello otorga, en consecuencia, una serie de ventajas:

- La disposición de la tensión de continua de entrada en múltiples niveles permite aumentar en varias veces la tensión de trabajo del convertidor empleando los mismos interruptores que en un convertidor convencional. Cada interruptor debe bloquear únicamente la tensión correspondiente a un nivel de tensión de continua, evitando el inconveniente de equilibrado estático y dinámico inherente a la asociación serie de dispositivos electrónicos. De hecho, no son los componentes sino las estructuras las que se conectan en serie, garantizando la distribución natural y satisfactoria de las tensiones.
- El empleo de mayores tensiones permite aumentar la potencia del convertidor sin necesidad de aumentar la corriente, conteniendo las pérdidas en conducción y, por tanto, mejorando el rendimiento del convertidor
- La frecuencia de conmutación del convertidor puede ser mayor que la frecuencia de conmutación de los interruptores (un múltiplo de ésta).
- La tensión de salida obtenida por un convertidor CC/CA multinivel presenta un contenido armónico inferior a la obtenida en un convertidor CC/CA convencional de potencia equivalente. Teóricamente se podría conseguir una distorsión armónica nula si se dispusiera de un número infinito de niveles de tensión de entrada. Una consecuencia sería la reducción de tamaño, peso y coste de los filtros. Puede reducirse la frecuencia de conmutación de los interruptores sin mermar la calidad en la tensión de salida.
- La forma de onda de la tensión de salida presenta un escalonado multinivel que limita los transitorios de nivel, que son causas de problemas, especialmente en bobinas de motores, problema agravado si la distancia del convertidor al motor es larga. En consecuencia, se reducen los problemas de interferencia electromagnética (EMI) y se alarga la vida del motor..



- La corriente de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja.
- Se genera una tensión de modo común inferior, por tanto se reduce la corriente parásita que circula por los rodamientos de los motores, alargando su vida útil. Además empleando una estrategia de conmutación adecuada, puede llegar a cancelarse la tensión en modo común.
- La respuesta dinámica del convertidor es más rápida, por tener más niveles de tensión de salida y por emplear filtros de menor tamaño.

Aun teniendo en cuenta todas sus ventajas, los convertidores CC/CA multinivel no están exentos de inconvenientes:

- Se emplea un número de interruptores elevado, por tanto la complejidad del control se incrementa significativamente.
- Es necesario disponer de diferentes niveles de tensión continua a la entrada, que pueden obtenerse mediante varias fuentes de continua o bien mediante capacidades. Cuando se empleen capacidades, se simplifica notablemente el circuito en el lado de continua, pero un requisito indispensable para el correcto funcionamiento del inversor es que las tensiones de las capacidades se mantengan constantes o equilibradas en cualquier condición de trabajo, con el objetivo de que cada capacidad actúe como una fuente de tensión constante (nivel de continua). Esta tarea, en absoluto obvia, debe ser asumida por el sistema de control del convertidor.

En general, en los convertidores CC/CA se consiguen mejores formas de onda de tensión y corriente de salida al aumentar la frecuencia de conmutación, pero en aplicaciones de media y alta tensión y potencia, los convertidores CC/CA de dos niveles presentan limitaciones a causa de las pérdidas por conmutación y de los valores máximos de tensión y corriente de los dispositivos semiconductores. Por esta razón, atendiendo a la actual tecnología de semiconductores, los convertidores CC/CA multinivel se muestran como una solución para trabajar con estos niveles de tensión y potencia, con posibilidades de responder a un futuro incremento en tensión y potencia.

Dos factores se muestran claves en el auge de la tecnología multinivel:



En primer lugar, el progreso de la tecnología de materiales semiconductores en estos últimos años, ha hecho posible realizar convertidores multinivel de mayor potencia y frecuencia de conmutación.

En segundo lugar, aunque la complejidad del control es uno de los inconvenientes de los convertidores multinivel, la evolución de los procesadores digitales de señal DSP con gran capacidad de cálculo, muy alta velocidad de procesado, que incorporan un gran número de periféricos, y con un coste asequible, hace técnica y económicamente viable la realización del control. Cabe añadir que, en aplicaciones de alta potencia, el coste del control sólo supone una pequeña parte del coste total del sistema.

Otro punto a favor de la tecnología multinivel se halla en la mayor exigencia de gobiernos e instituciones (normativas de compatibilidad electromagnética) en la reducción de los contenidos armónicos de tensión y corriente, con el objetivo de preservar la calidad de la red, unido a la creciente demanda de potencia por parte de aplicaciones y convertidores.

Como breve resumen, el desarrollo de los convertidores multinivel se propicia por el incremento de la demanda de potencia, con conexión a mayor tensión, por parte de las aplicaciones, y se posibilita gracias al progreso de la tecnología de los semiconductores de potencia (IGBT, IGCT) y de los sistemas de control digitales DSP, así como de la disminución de sus costes. Los convertidores multinivel se configuran, por tanto, como una opción competitiva frente a los convertidores convencionales CC/CA de alta frecuencia.

4.1 Topología

El presente proyecto fin de carrera se centra en las simulaciones y análisis de convertidores CC/CA multinivel para aplicaciones en energía eólica, por tanto, resulta de gran interés conocer a priori las topologías multinivel básicas, junto con las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de ellas. En este apartado de la presente memoria no se pretende realizar un análisis completo y exhaustivo de todas las topologías multinivel existentes, pero se desea presentar aquellas topologías que son objeto de mayor estudio, ya sea por sus mejores características, mayores estudios actuales o mejor penetración en aplicaciones para sistemas de energía eólica, así como mostrar las diferencias entre ellas. Las topologías básicas a desarrollar son:

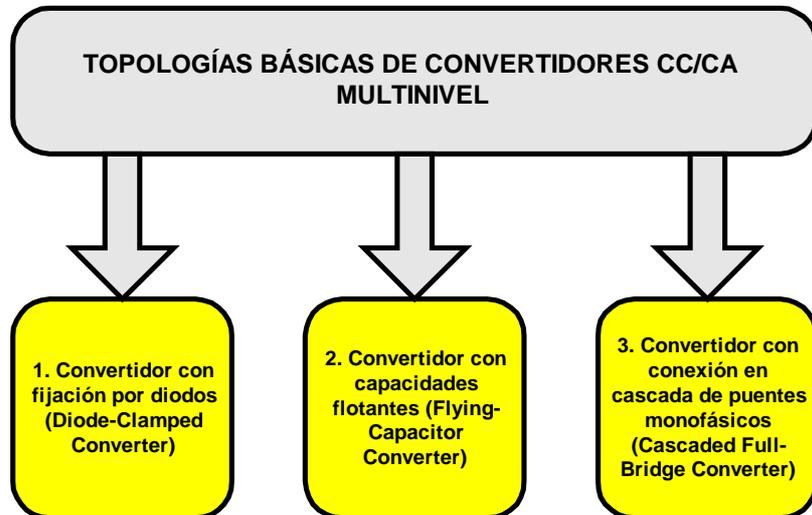


Ilustración 21. Esquema de topologías de convertidores CC/CA multinivel

Se describen a continuación:

4.1.1 Convertidor con fijación por diodos (Diode-Clamped Converter)

La primera topología multinivel (y todavía objeto de un amplio estudio) es la topología Diode-Clamped o Neutral-Point-Clamped (NPC). Este inversor se caracteriza por dividir el voltaje de la barra DC en una cierta cantidad de niveles por medio de condensadores conectados en serie. La cantidad de diferentes niveles de voltaje caracteriza al inversor. En la figura 22 se muestra un Inversor de tres niveles, obtenidos con los condensadores C1 y C2 conectados en serie.

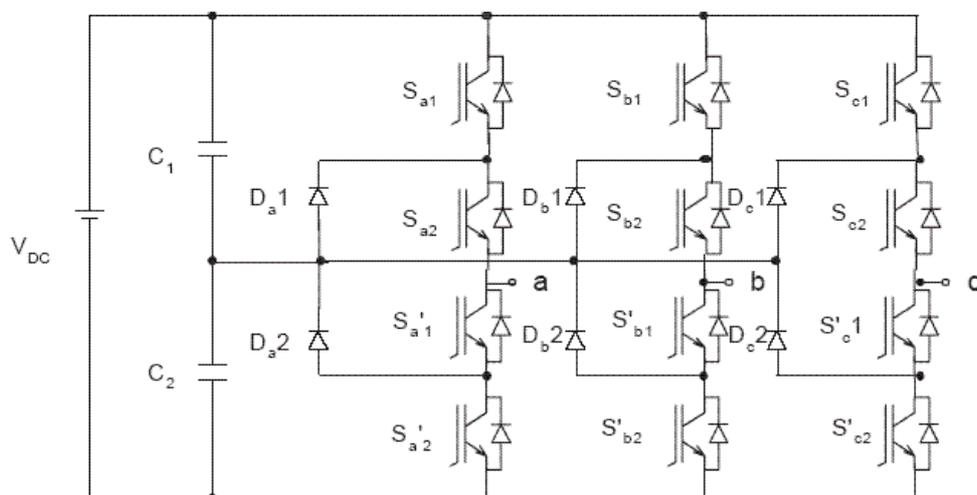


Ilustración 22. Esquema general inversor trinivel NPC.



El punto medio n entre los dos condensadores se puede definir como punto neutro. El voltaje de salida V_{an} se caracteriza por tener tres estados o niveles: $V_{dc}/2$, 0, y $-V_{dc}/2$ con respecto al punto neutro. En la tabla 1 se muestra la secuencia de encendido de los semiconductores que se debe utilizar para generar los diferentes voltajes de salida para el inversor de la figura 22.

Tensión salida V_{a0}	Estado interruptores			
	S_{a1}	S_{a2}	S'_{a1}	S'_{a2}
V_{DC}	1	1	0	0
$V_{DC}/2$	0	1	1	0
0	0	0	1	1

Tabla 1. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 15

En este tipo de inversor, los diodos ($Da1$ y $Da2$) son componentes clave que no se encuentran en los inversores de dos niveles comunes. Estos diodos acoplan el voltaje de conmutación para dividir el nivel de voltaje de la barra DC. Cuando S_{a1} y S_{a2} están simultáneamente cerrados ($S_{a1} \rightarrow 1$ y $S_{a2} \rightarrow 1$), el voltaje entre a y 0 es V_{dc} . En este caso, $Da2$ balancea el voltaje entre S'_{a1} y S'_{a2} haciendo que S_{a1}' bloquee el voltaje en $C1$ y que S'_{a2} bloquee el voltaje en $C2$.

La figura 23 representa un Inversor de cinco niveles, generados por los condensadores $C1$, $C2$, $C3$ y $C4$ conectados en serie. Para una barra DC de voltaje V_{dc} , el voltaje de cada condensador será $V_{dc}/4$.

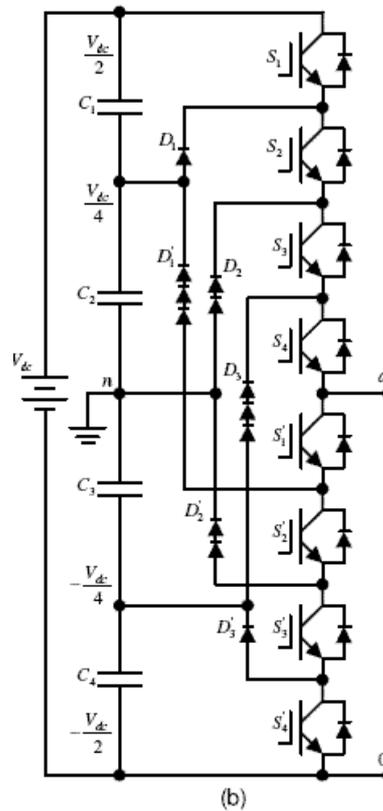


Ilustración 23. Esquema de Inversor Acoplado por Diodo de Cinco Niveles.

Considerando el punto n como referencia del voltaje, se puede explicar mediante la tabla 2 como se forman los diferentes nivel de tensión para el Inversor de la figura 23. Asumiendo que el voltaje inverso de cada diodo es el mismo que el de los semiconductores, el número de diodos que se requiere para una fase del inversor será: $(5-1) \cdot (5-2)$. Para el caso del inversor de cinco niveles de la figura tendríamos 12 diodos para la fase a y 36 diodos para un inversor trifásico. Este número crece cuadráticamente a medida que aumenta los niveles.

Tensión salida V_{a0}	Estado interruptores							
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	S'_{a1}	S'_{a2}	S'_{a3}	S'_{a4}
V_{DC}	1	1	1	1	0	0	0	0
$3V_{DC}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_{DC}/2$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_{DC}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 2. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 16

A medida que aumenta el número de niveles de tensión, aumenta el número de componentes. Un inversor de n niveles de tensión presenta $(n-1)$ condensadores en el



bus de continua, cada uno de ellos bloqueando una tensión $V_{dc}/(n-1)$. Pese a que cada interruptor sólo debe soportar $V_{dc}/(n-1)$, los diodos han de soportar diferentes rangos de tensión inversa, ya que deben poder bloquear la tensión de más de un condensador, en función del estado de conmutación. Asumiendo que el rango de tensión que debe bloquear cada diodo es igual al rango de tensión máximo en cada rama, el número de diodos necesarios en cada fase es $(n-1) \cdot (n-2)$. Este número aumenta cuadráticamente con n , por lo que ésta topología es inviable para un número muy elevado de niveles. La recuperación inversa de los diodos y las limitaciones que conllevan es el principal inconveniente de esta topología.

La topología NPC presenta, respecto a otras topologías, varias ventajas:

- ◆ Bajo número de condensadores. El número de capacidades requerida es pequeño en comparación con otras topologías multinivel. Este punto es especialmente interesante dado que son los componentes reactivos los que suponen un mayor coste en el convertidor.
- ◆ Se pueden conectar directamente a un bus de continua, sin necesidad de crear otros buses adicionales.
- ◆ No requiere transformadores.
- ◆ Cambio de un estado a otro accionando un solo interruptor.
- ◆ Junto con la topología de condensadores flotantes comparten la ventaja de poderse conectar a una misma tensión del embarrado de continua, a diferencia de la topología de convertidores en cascada que requiere fuentes de alimentación de continua aisladas.

Sin embargo, y como hemos comentado anteriormente, también presentan los inconvenientes siguientes:

- ◆ Acentúan el problema de los desequilibrios en las tensiones inversas que han de soportar los diodos de bloqueo conforme aumenta el número de niveles.

- ◆ Complican la estrategia de control para evitar el desequilibrio en las tensiones de los condensadores del embarrado de continua a medida que se incrementa el número de niveles del convertidor.

4.1.2 Convertidor con capacidades flotantes (Flying-Capacitor Converter)

Un convertidor de esta topología dispone de una serie de condensadores conectados en modo flotante de manera que permiten proporcionar los niveles de tensión adecuados, generados en la topología DCM mediante los condensadores del embarrado de continua y los diodos de conexión.

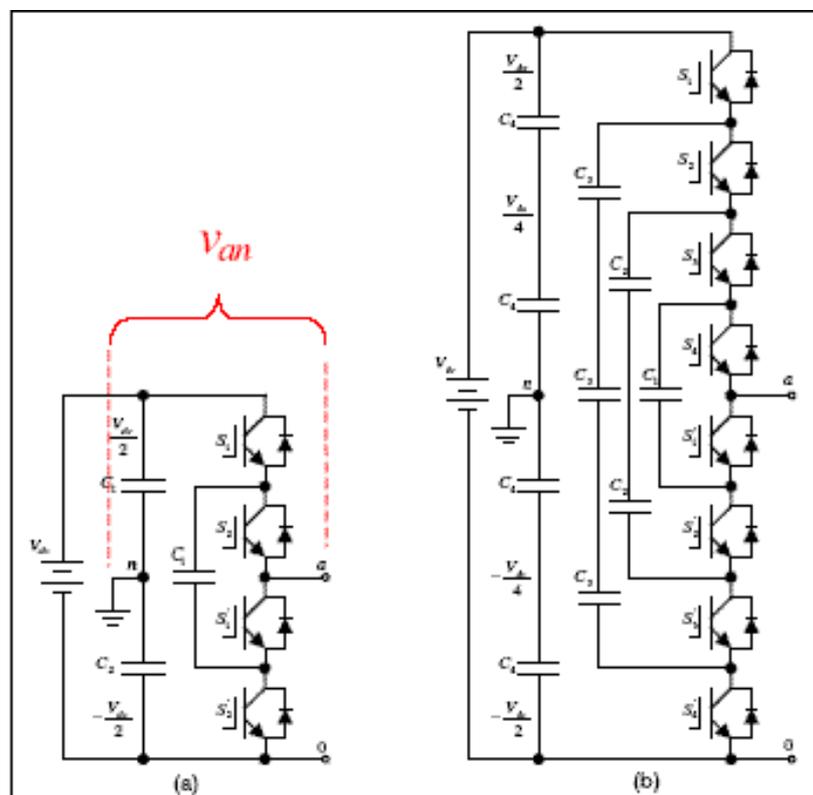


Ilustración 24. Esquema Inversor Acoplado por Condensador. (a) Tres niveles. (b) Cinco niveles.

En la figura 24 se muestra el diagrama esquemático de inversores acoplados por condensador. El inversor de la figura 24 (a) corresponde a uno de tres niveles, el cual genera entre los terminales **a** y **n** los siguientes voltajes: $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$. En la tabla 3 se pueden ver las combinaciones de los semiconductores que deben estar conduciendo para generar los diferentes niveles de tensión.

V_{an}	S_1	S_2	S_1'	S_2'
$V_{dc}/2$	1	1		
0	1		1	
0		1		1
$-V_{dc}/2$			1	1

Tabla 3. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 17 (a)

La forma de conseguir los diferentes niveles de tensión en el inversor acoplado por condensador es más flexible comparado con el Inversor acoplado por diodo. Esto se nota aún más en el caso del inversor de cinco niveles, en el cual existen diferentes combinaciones de encendido para obtener un mismo nivel de tensión. Utilizando como ejemplo la figura 24 (b), el voltaje del inversor de cinco niveles, V_{an} , puede ser obtenido con las combinaciones de la tabla 4.

V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'
$V_{dc}/2$	1	1	1	1				
$V_{dc}/4$	1	1	1		1			
$V_{dc}/4$		1	1	1				1
$V_{dc}/4$	1		1	1			1	
0	1	1			1	1		
0			1	1			1	1
0	1		1		1		1	
0	1			1		1	1	
0		1		1		1		1
0		1	1		1			1
$-V_{dc}/4$	1				1	1	1	
$-V_{dc}/4$				1		1	1	1
$-V_{dc}/4$			1		1		1	1
$-V_{dc}/2$					1	1	1	1

Tabla 4. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 17 (b)

Similarmente a como ocurre con el inversor acoplado por diodo, el inversor acoplado por condensador requiere un gran número de condensadores para hacer flotar el voltaje. De esta forma, un Inversor de n-niveles requerirá un total de $(n-1) \times (n-2) / 2$ condensadores de flotación, además del condensador de alto voltaje que seguramente



se requerirá como filtro de entrada. Este último deberá ser implementado con una cadena de condensadores en serie si el voltaje continuo es demasiado alto.

A continuación se enumeran algunas importantes ventajas presentadas por la topología de condensadores flotantes:

- ◆ Evita los problemas que presentan los diodos de conexión en las topologías Diode-Clamped.
- ◆ Limita la variación de la tensión con el tiempo en los dispositivos de potencia e introduce estados de conmutación adicionales utilizados para mantener el equilibrio de la carga en los condensadores.
- ◆ Presenta más de una combinación de los vectores de conmutación para producir las tensiones intermedias de la parte de continua, presentando por ello más flexibilidad que los convertidores Diode-Clamped.
- ◆ Puede emplearse como convertidor CC/CC, sin que el equilibrado de las tensiones de las capacidades sea un problema gracias a los estados redundantes, aún con corriente unidireccional.
- ◆ Cada rama del convertidor puede ser analizada independientemente. A diferencia de la topología Diode-Clamped en la cual se estudia el problema del balanceo considerando el sistema completo.

La topología de condensadores flotantes presenta las siguientes desventajas:

- ◆ El controlador de carga de los condensadores del embarrado de continua incrementa la complejidad de todo el circuito.
- ◆ La topología de condensadores flotantes requiere más condensadores que la Diode-Clamped y además, las corrientes que fluyen a través de dichos condensadores son elevadas. Hasta el momento no hemos encontrado ningún estudio exhaustivo relativo a estos inconvenientes en la bibliografía disponible. Sin embargo, sabemos que los condensadores flotantes de una misma rama están sometidos a muy diferentes tensiones y como la intensidad es la misma



deberían presentar las mismas capacidades para producir similares amplitudes del rizado de tensión. Como consecuencia de esto, el número de condensadores se incrementa debido al requerimiento de conexiones serie y paralelo.

- ◆ Existe un potencial debido a la resonancia parásita entre los condensadores de acoplo.

- ◆ En convertidores de más de tres niveles algunas transiciones entre dos niveles de tensión consecutivos producen altas frecuencias de conmutación. Si se evitan estas transiciones la amplitud del rizado de la tensión en los condensadores se incrementaría hasta tal punto que podría provocar la pérdida de control de la tensión de los condensadores flotantes

4.1.3 Convertidor con conexión en cascada de puentes monofásicos (Cascaded Full-Bridge Converter)

Se puede casi duplicar el número de niveles de las topologías anteriores sin hacer crecer el número de fuentes de voltaje, utilizando la estrategia de los *Puentes H*. Esto permite a la carga evitar el retorno directo hacia las fuentes de tensión continua y elevar el número de niveles de $n+1$ a $2n+1$. El puente H más sencillo es aquél formado por configuraciones de dos niveles de puentes monofásicos.

Estos puentes H pueden conectarse en cascada (serie o paralelo), y dependiendo del número de puentes (etapas) que se conecten, se podrá obtener un número diferente de niveles de tensión. La relación que existe entre el número de niveles de tensión y el de etapas se verá más adelante.

Este tipo de inversores se puede separar en simétricos y asimétricos. Los simétricos tienen todas las fuentes independientes con la misma tensión, en cambio los asimétricos poseen fuentes de diferentes tensiones.

En la figura 25 se muestra el diagrama de conexión para un Inversor en Cascada Simétrico de dos etapas. Este inversor puede generar voltajes de salida que van desde $-2V_{dc}$ a $+2V_{dc}$ con cinco niveles diferentes (dos en el semiciclo positivo, dos en el semiciclo negativo y el cero, con escalones iguales a V_{dc}).

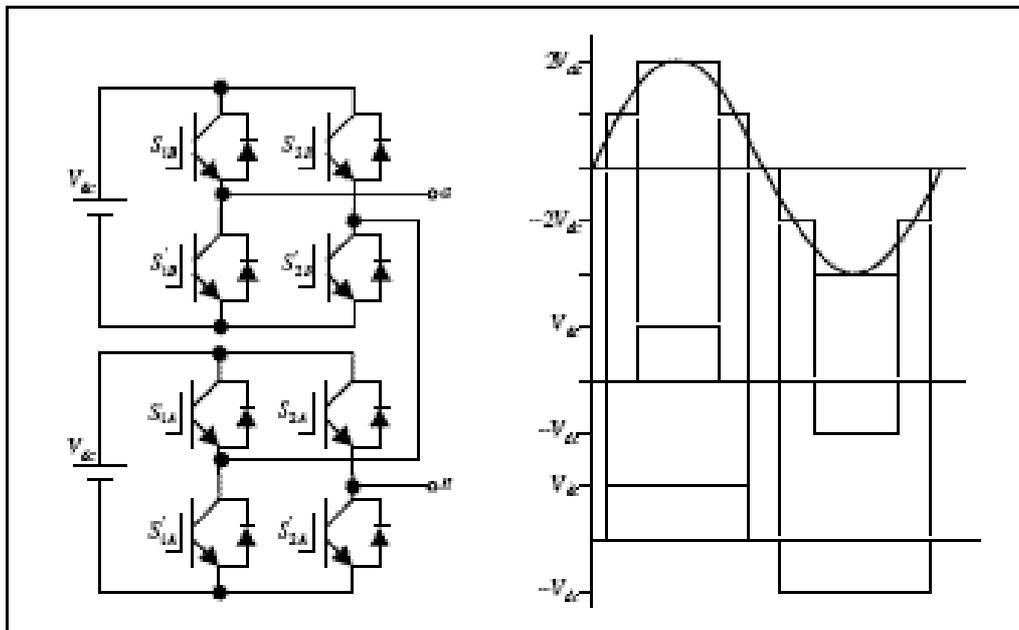


Ilustración 25. Inversor en Cascada Simétrico de dos Etapas.

Para conseguir los diferentes niveles de tensión se debe utilizar la secuencia de conmutación que se muestra en la tabla 5, la que se construyó siguiendo la secuencia de la senoide de la figura 25. Además, se puede apreciar que para generar los diferentes niveles de tensión hay más de una combinación posible.

V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S_{1A}'	S_{2A}'	S_{1B}	S_{2B}	S_{1B}'	S_{2B}'
0	1	1			1	1		
V_{dc}	1			1	1	1		
$2 V_{dc}$	1			1	1			1
V_{dc}	1			1			1	1
0			1	1			1	1
$-V_{dc}$		1	1				1	1
$-2 V_{dc}$		1	1			1	1	
$-V_{dc}$		1	1		1	1		

Tabla 5. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 18

En la figura 26 se muestra el diagrama de conexión para un Inversor en Cascada Asimétrico de dos etapas. Este inversor puede generar voltajes de salida que van desde $-1.5V_{dc}$ a $+1.5V_{dc}$ con cinco niveles diferentes (dos en el semiciclo positivo, dos en el semiciclo negativo y el cero) de la misma forma que para el Inversor Simétrico, según se muestra en la figura 26 (a).

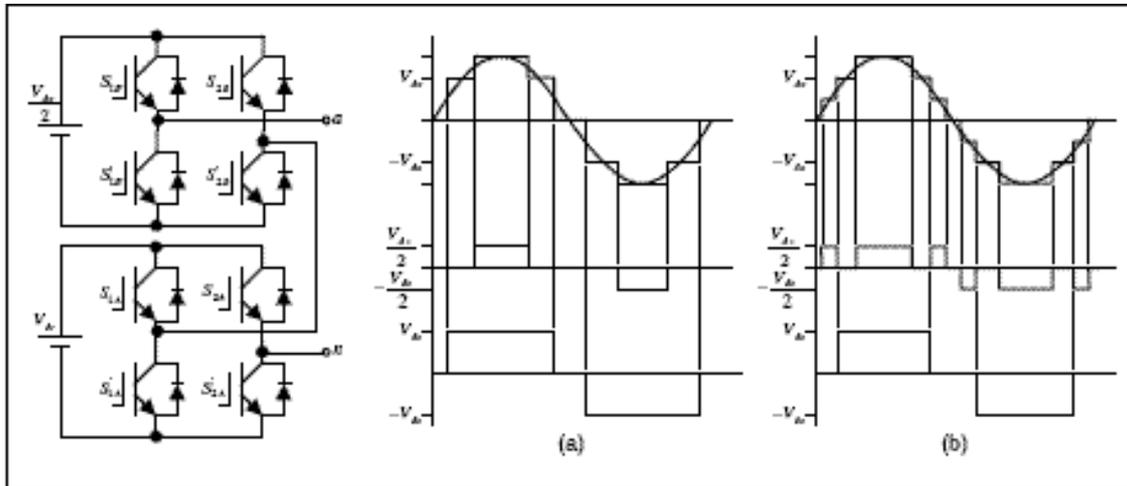


Ilustración 26. Inversor en Cascada Asimétrico de dos Etapas (a) operando con cinco niveles, (b) operando con siete niveles

Para conseguir los diferentes niveles de tensión se debe utilizar la misma secuencia de conmutación que la mostrada en la tabla 5, pero con una diferencia en los niveles de tensión. En la tabla 6 se pueden apreciar los niveles de tensión correspondientes al Inversor en Cascada Asimétrico.

V_{an}	S_{1A}	S_{2A}	S_{1A}'	S_{2A}'	S_{1B}	S_{2B}	S_{1B}'	S_{2B}'
0	1	1			1	1		
V_{dc}	1			1	1	1		
$1.5 V_{dc}$	1			1	1			1
V_{dc}	1			1			1	1
0			1	1			1	1
$-V_{dc}$		1	1				1	1
$-1.5 V_{dc}$		1	1			1	1	
$-V_{dc}$		1	1		1	1		

Tabla 6. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 19 (a)

Analizando el caso del Inversor Asimétrico, es posible generar mayor número de niveles de tensión de salida con esta misma configuración. Para ello es necesario agregar más combinaciones a las que se mostró anteriormente. Como se muestra en la figura 26 (b), con este inversor se pueden generar hasta siete niveles de tensión diferentes, los que se mantienen dentro del mismo rango antes mencionado. En la tabla 7 se agregan los niveles adicionales y sus respectivas combinaciones de conmutación.

V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'
0	1	1			1	1		
$0.5 V_{dc}$	1	1			1			1
V_{dc}	1			1	1	1		
$1.5 V_{dc}$	1			1	1			1
V_{dc}	1			1			1	1
$0.5 V_{dc}$			1	1	1			1
0			1	1			1	1
$-0.5 V_{dc}$			1	1		1	1	
$-V_{dc}$		1	1				1	1
$-1.5 V_{dc}$		1	1			1	1	
$-V_{dc}$		1	1		1	1		
$-0.5 V_{dc}$	1	1				1	1	

Tabla 7. Secuencia de encendido para el inversor de la figura 19 (b)

Se puede apreciar que el Inversor Asimétrico permite generar una senoide escalonada que se asemeja mejor a una senoide real que el Inversor Simétrico. Esto porque un inversor Asimétrico, como en la figura 26 puede generar un número mayor de niveles que uno Simétrico. En la tabla 8 se muestra una comparación entre utilizar el esquema simétrico frente al asimétrico, aquí se puede observar que el aumento del número de niveles es considerablemente importante.

Nº Etapas	Simétrico	Asimétrico
2	5	7
3	7	15
4	9	31
5	11	63

Tabla 8. Número de niveles de tensión para inversores Simétricos y Asimétricos de diferente número de etapas.

Es necesario mencionar que en el ejemplo de la tabla 8, las fuentes de voltaje que se agregan en el caso del Inversor Asimétrico, son la mitad del valor de la anterior. Es decir, la fuente adicional que se le agrega al Inversor Asimétrico de 3 etapas con respecto al de dos etapas es de $0.25V_{dc}$, por lo tanto este inversor tendría las siguientes fuentes independientes: V_{dc} , $0.5V_{dc}$ y $0.25V_{dc}$. De esta forma, los niveles de tensión de salida para este inversor serían: 0, $0.25V_{dc}$, $0.5V_{dc}$, $0.75V_{dc}$, V_{dc} , $1.25V_{dc}$, $1.5V_{dc}$, $1.75V_{dc}$ y los respectivos valores negativos. Más adelante se verá que el número de niveles puede aumentarse aún más, escogiendo relaciones de tensión entre las fuentes independientes diferentes de una reducción a la mitad.

Los convertidores Cascaded Full-Bridge presentan las principales ventajas:

- ◆ Al estar constituidos por asociaciones de etapas en puente, la construcción puede ser modular, rebajando la complejidad del montaje y coste. En consecuencia, el número de niveles de puede incrementar fácilmente añadiendo nuevas etapas iguales, sin necesidad de incorporar nuevos componentes. Además, la modularidad facilita el mantenimiento del sistema.
- ◆ Requieren menor número de componentes que otras topologías multinivel para alcanzar el mismo número de niveles. No necesitan diodos de fijación ni capacidades flotantes.
- ◆ La topología es tolerante a fallos, puesto que el convertidor puede continuar funcionando con un menor nivel de tensión aunque una de sus etapas esté cortocircuitada.
- ◆ El sistema de control no velar por el equilibrio de las capacidades del convertidor, simplificando su realización. Deben exceptuarse aquellos casos en que las fuentes de continua se sustituyen por capacidades, por ejemplo en aplicaciones de corrección del factor de potencia o filtrado activo.

La topología Cascaded Full-Bridge presenta las siguientes desventajas:

- ◆ El principal problema que presenta este tipo de topología es el coste y complejidad que implica tener fuentes de tensión independientes para cada puente completo. Por tanto será necesario emplear un transformador con múltiples secundarios o bien múltiples transformadores independientes para cumplir este requisito.
- ◆ Las características del transformador hacen que se incremente el coste del convertidor de forma notable.
- ◆ La conexión de las fuentes aisladas entre dos convertidores en los montajes tipo CA/CC/CA bidireccionales (back-to-back) no es posible ya que se produce un cortocircuito, a menos que los convertidores conmuten sincronamente.

4.2 Comparación entre topologías

En la tabla 9 se presenta un estudio comparativo entre las tres topologías más extendidas de convertidores multinivel de n niveles, expuestas anteriormente, donde se especifican los requerimientos de componentes de potencia por cada una de las fases. De esta tabla se deduce que la topología multinivel en cascada es la que requiere menor número de componentes.

Configuración	DCM	Condensadores flotantes	Cascada
Interruptores principales	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$2(n-1)$
Diodos principales	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$2(n-1)$
Diodos de conexión	$(n-1)(n-2)$	0	0
Condensadores del embarrado de continua	$(n-1)$	$(n-1)$	$(n-1)/2$
Condensadores de equilibrado	0	$(n-1)(n-2)/2$	0

Tabla 9. Comparación de los requerimientos de componentes de potencia por fase de convertidores multinivel.

4.3 Estrategias de conmutación Multinivel

Las técnicas de modulación de convertidores multinivel se pueden clasificar atendiendo a la frecuencia de conmutación. En la mayoría de las aplicaciones industriales, para altas frecuencias de conmutación, con los dispositivos de potencia conmutando un número elevado de veces en un periodo de la tensión de salida fundamental, se suelen utilizar las técnicas PWM senoidal basada en portadora (SPWM) y la técnica de modulación vectorial de vectores de estados PWM (SVPWM). En general, las técnicas de modulación PWM de convertidores multinivel son una extensión de los métodos de dos niveles expuestos al comienzo de este capítulo.

Las técnicas de modulación más usuales empleadas en sistemas que trabajan con baja frecuencia de conmutación, una o dos conmutaciones por ciclo, son la eliminación armónica selectiva SHEPWM y el control de vectores de estado (SVC).

Se muestra a continuación el esquema de las estrategias de control:

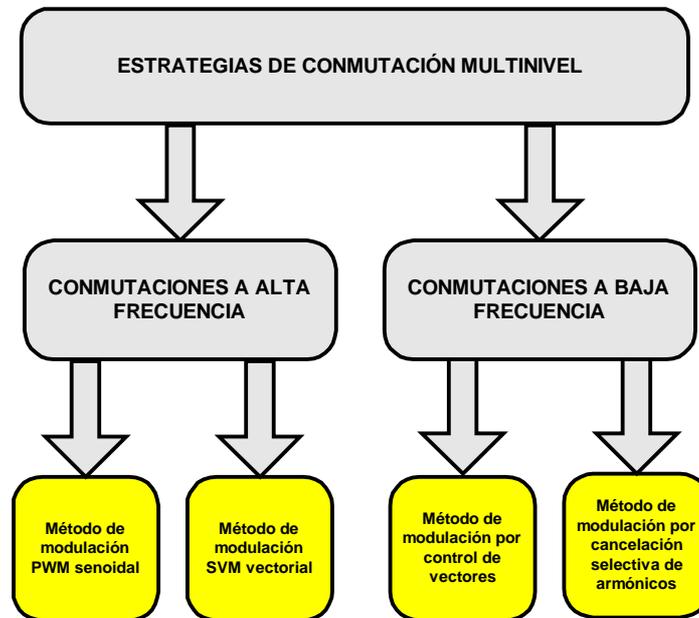


Ilustración 28. Esquema de estrategias de control multinivel

Los dos aspectos más importantes a considerar en la elección de la técnica de control de convertidores multinivel son principalmente la reducción de armónicos y la reducción de las pérdidas de conmutación.

El objetivo de este apartado es el de mostrar una panorámica de las estrategias de conmutación multinivel más empleadas, con las ventajas e inconvenientes que ofrecen, sin realizar una descripción exhaustiva, que no es la finalidad del presente proyecto, de cada una de ellas. Veamos las estrategias de control:

4.3.1 Método de modulación PWM senoidal

La modulación por ancho de pulso PWM es una de las técnicas de modulación más ampliamente empleada y estudiada en aplicaciones industriales, debido a su simplicidad y a los buenos resultados que garantiza en todas las condiciones de trabajo, incluida la sobremodulación. Esta técnica consiste en comparar una señal de consigna senoidal, denominada moduladora, con una señal denominada portadora, usualmente de forma triangular, en algunos casos de tipo diente de sierra.

La comparación de estas dos señales da como resultado las órdenes de conmutación de los interruptores del convertidor. Este método de modulación es flexible, permite emplear diferentes moduladoras y portadoras que se pueden dividir en dos grandes bloques:

a) Estrategia de conmutación basada en portadora modificada.

Este tipo de estrategia de modulación se basa en la modificación de las portadoras con el objetivo de sintetizar salidas senoidales con el mejor espectro armónico. Este tipo de modulación se puede dividir en dos subtipos: variación de la polaridad o variación de la fase de las portadoras.

Para el subtipo de variación de la polaridad se emplean tres tipos de portadoras:

- ◆ Tipo 1) Portadoras alternadas en contrafase
- ◆ Tipo 2) Portadoras con simetría respecto al eje horizontal
- ◆ Tipo 3) Todas las portadoras en fase

El análisis muestra que el espectro armónico de los tipos 1) y 2) es de características similares, donde no aparece armónicos a frecuencia de conmutación pero sí múltiplos impares a ambos lados de esta frecuencia. Para el tipo 3), existen armónicos a frecuencia de conmutación, armónicos pares alrededor de múltiplos impares y armónicos impares alrededor de inexistentes múltiplos pares de la portadora. En cualquier caso, cuando el índice de modulación es elevado, no existe diferencia sustancial de los tres tipos de portadora.

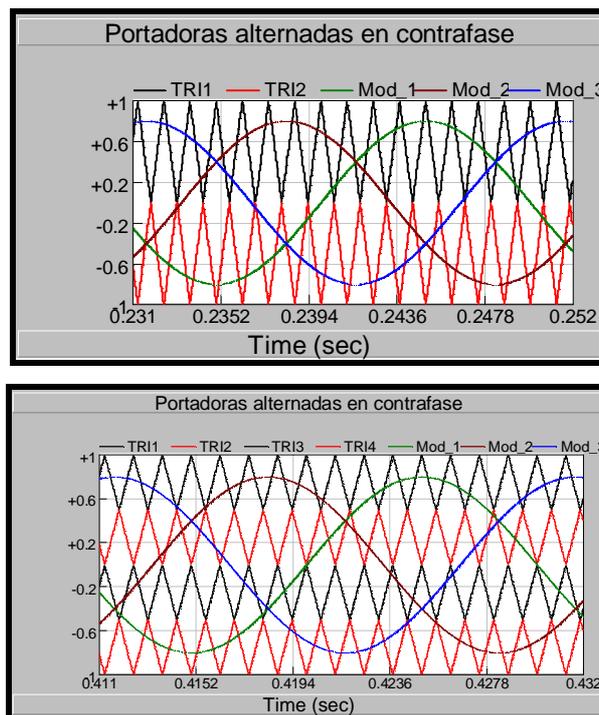


Ilustración 29. Portadoras alternadas en contrafase para 3 y 5 niveles

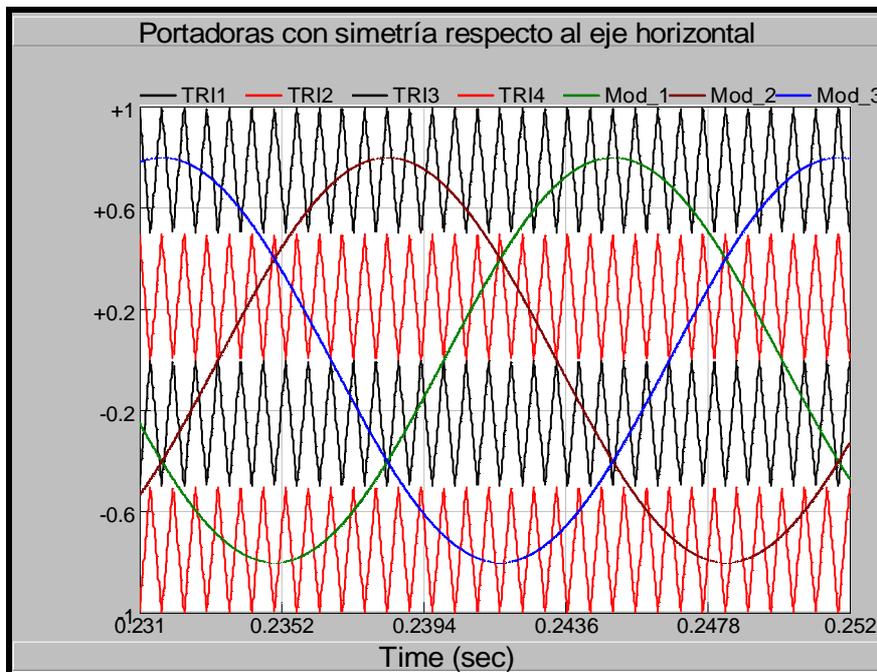


Ilustración 30. Portadoras con simetría respecto al eje horizontal

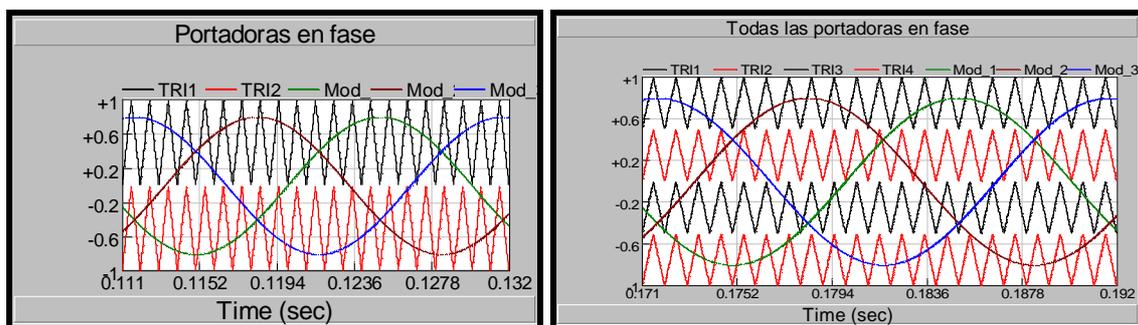


Ilustración 31. Todas las portadoras en fase para 3 y 5 niveles

Por otro lado, el subtipo de variación de fase de las portadoras introduce entre la portadora o portadoras respecto la referencia. Este método ha sido menos investigado y aplicado que los basados en variaciones de la polaridad de la portadora. El efecto del desfase puede ser significativo en la frecuencia de conmutación de los interruptores, dependiendo del índice de modulación y del desfase entre portadora y moduladora. Una buena selección de este desfase puede llegar a reducir las pérdidas hasta un 35%.

b) Estrategia de conmutación basada en múltiples portadoras

Esta estrategia de modulación de basa en la utilización de múltiples moduladoras y una única portadora triangular, y también se puede encontrar bajo el nombre de

modulación bipolar. En la figura 31 se muestra la portadora triangular y dos moduladoras para el caso de un convertidor trinivel. Las dos moduladoras se obtienen sumando desplazamientos (offset) positivos y negativos a la moduladora convencional. Estos desplazamientos pueden ser constantes o variables, y su objetivo consiste en conmutar los niveles intermedios al pasar de los niveles superiores a los inferiores o viceversa. Frente a otras estrategias de conmutación, este tipo de modulación no presenta el problema del pulso mínimo y ofrece mejor contenido armónico, cuando se trabaja a bajo índice de modulación.

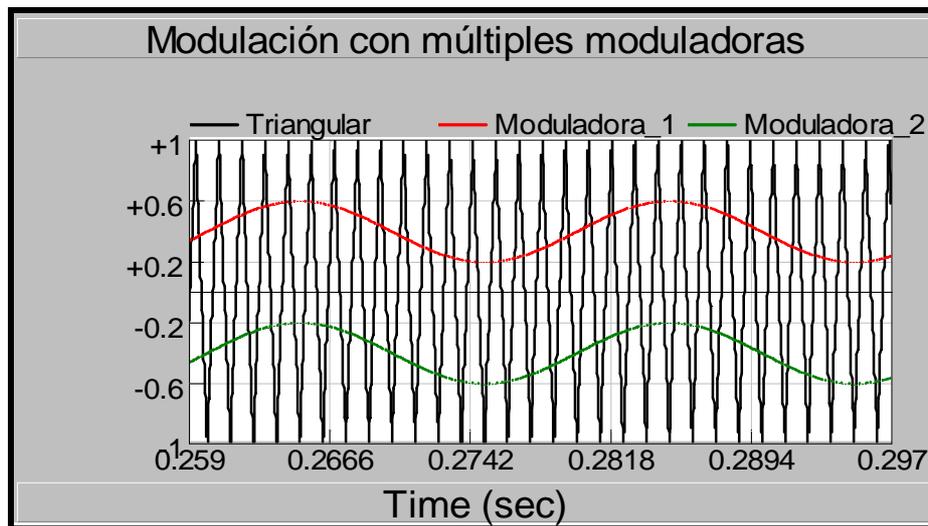


Ilustración 32. Modulación bipolar para un inversor de tres niveles

Una práctica habitual en la estrategia de conmutación PWM senoidal consiste en sumar una componente de tercer armónico a la señal moduladora senoidal, con el objetivo de incrementar la componente fundamental de la tensión de salida hasta un 15% dentro de la zona lineal. La siguiente figura 32 muestra un ejemplo donde se ha sumado un tercer armónico cuya amplitud es $\frac{1}{4}$ de la amplitud fundamental senoidal. El efecto causado por la suma del tercer armónico es similar al uso de la modulación vectorial SVM con un reparto específico del estado de tensión nula.

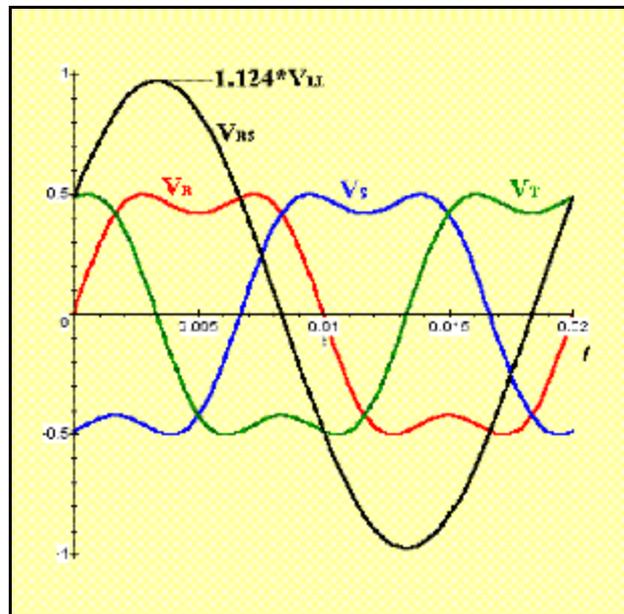


Ilustración 33. PWM_Modificado. Tensiones de Fase y Línea al añadir un Tercer Armónico de amplitud $\frac{1}{4}$ de la fundamental.

La realización física de la modulación PWM senoidal es simple, empleando integradores analógicos y comparadores para la generación de las señales de conmutación. Hoy en día, es más habitual emplear sistemas digitales para generar las señales de conmutación, donde los integradores digitales se sustituyen por temporizadores digitales específicos, denominados temporizadores PWM. De la comparación entre la moduladora discretizada y el temporizador PWM se obtiene la señal de conmutación, proceso denominado muestreo natural o regular.

Para finalizar con la estrategia de modulación PWM senoidal, algunas de sus características son:

- ◆ Simplicidad
- ◆ Contenido en armónico reducido
- ◆ Buen resultado incluso en sobremodulación
- ◆ Algunos niveles del convertidor no se emplean cuando el índice de modulación es bajo.

4.3.2 Método de modulación SVM vectorial

La modulación basada en los vectores espaciales de tensión (*Space Vector Modulation*) SVM o SVM-PWM es bien conocida y ampliamente utilizada en convertidores convencionales y multinivel. Cada uno de los posibles estados del

convertidor se representa mediante un convertidor de tensión, y el conjunto de todos estos vectores de estado configura el diagrama vectorial de tensiones del convertidor. La tensión de salida deseada se puede expresar como un vector de referencia o modulación dentro del diagrama vectorial de tensiones, cuyo módulo se relaciona con la amplitud de la tensión de salida, cuya velocidad de giro es igual a la pulsación deseada de la tensión de salida y su fase coincide con la fase de salida. La siguiente figura 33 representa el diagrama de vectores de estado para un convertidor de tres niveles o trinivel, con 27 estados posibles expresados por 19 vectores de estados diferentes, junto con un posible vector de modulación. El siguiente diagrama de vectores de estados es universal, independientemente del convertidor.

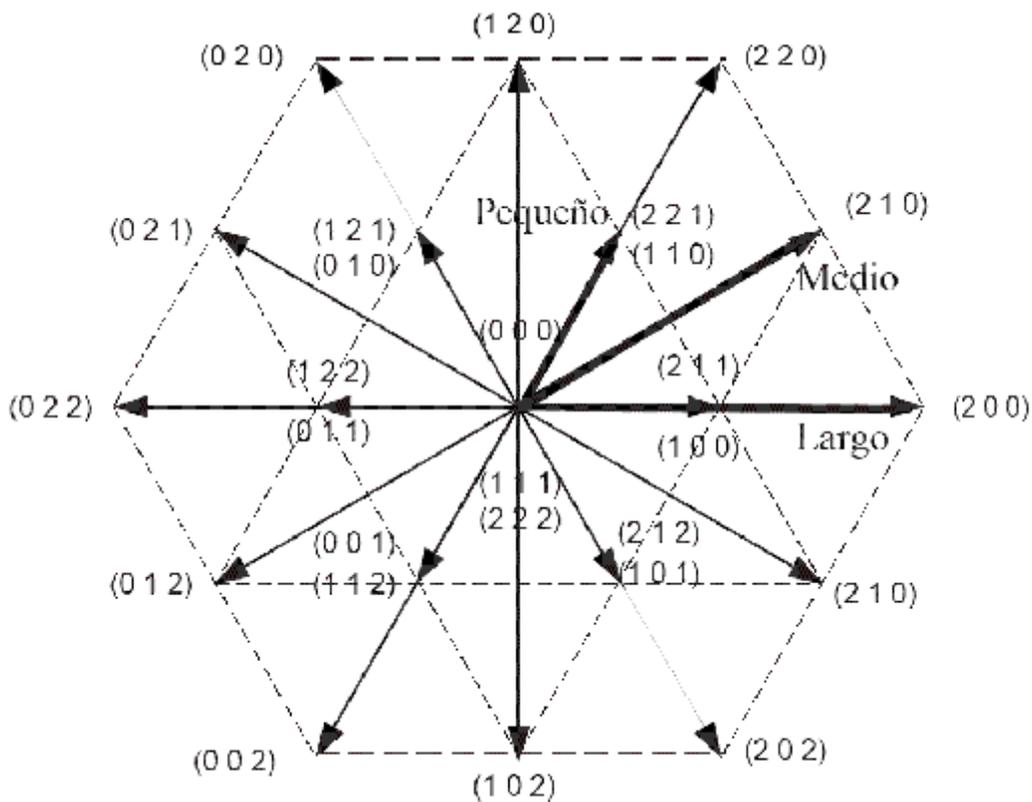


Ilustración 34. Diagrama de vectores de estado de un inversor de tres niveles

El giro del vector de referencia se discretiza cada periodo de conmutación. Dentro de un periodo de conmutación, se debe generar el vector de referencia correspondiente a ese periodo a partir de los vectores del diagrama vectorial de tensiones. Dado que cada vector de modulación discretizado normalmente no coincide con ningún vector de estado del convertidor, se genera su valor a partir del promediado de dos o más vectores de estado. La selección de los vectores de estado con los que se obtiene el valor promediado en cada periodo de conmutación continúa siendo un tema discutido,



aunque probablemente la selección más empleada sea escoger los tres vectores más cercanos al vector de modulación (*Nearest three vectors- NTV*). Esta selección de vectores es el método básico para obtener un contenido armónico reducido en la tensión de salida y mantener el equilibrio de las capacidades del convertidor mediante la selección adecuada de los estados redundantes del convertidor.

Cuando el vector de modulación se sitúa próximo a un vértice de cualquier región del diagrama de vectores de estado, alguno de los estados del convertidor debe permanecer activado un tiempo muy corto, que incluso puede ser menor que el tiempo mínimo del pulso que el convertidor es capaz de generar. Este problema suele denominarse como el problema del pulso estrecho.

En cualquier caso, las técnicas de modulación PWM senoidal y SVM (*Space Vector Modulation*) están fuertemente relacionadas. Wang muestra que se puede tener una modulación SVM empleando una modulación PWM senoidal con una adición adecuada de tensión de modo común o secuencia cero. La adición de una tensión adecuada en modo común se emplea para mantener equilibradas las capacidades de un convertidor Diode-Clamped trinivel. Mientras Holmes indica que la única diferencia entre ambas técnicas reside en la ubicación temporal de los vectores de estado tensión cero. La adición de una tensión adecuada en modo común se emplea para mantener equilibradas las capacidades de un convertidor Diode-Clamped trinivel.

Algunas de las características de la modulación SVM son:

- ◆ Los valores de las tensiones de salida con SVM son hasta un 15% superiores a los obtenidos empleando una modulación PWM senoidal.
- ◆ Seleccionando apropiadamente la secuencia de los vectores escogidos, pueden reducirse las pérdidas de conmutación del convertidor.
- ◆ La modulación se puede abordar fácilmente desde el dominio de Park o P-Q, lo que facilita su empleo junto con técnicas de control vectorial.
- ◆ El cálculo requerido es simple y poco extenso, por tanto es fácil de realizar en un dispositivo de control digital.

♦ La complejidad de la selección de los vectores de estado y de los estados redundantes se incrementa de forma severa con el número de niveles del convertidor.

El método de modulación SVM resulta ser una técnica idónea en aplicaciones de alta tensión y alta potencia, pues permite obtener bajo rizado en corriente y una fácil implementación en procesadores digitales. Esta técnica presenta además otra ventaja con respecto a las demás, y ésta es la libertad de elección de la secuencia de conmutación, sujeta a un criterio adecuado que garantice bajo rizado y mínimo número de conmutaciones, ofreciendo flexibilidad en el control.

Veamos una comparación de armónicos entre las dos estrategias estudiadas hasta el momento, la modulación PWM senoidal y la modulación SVM vectorial:

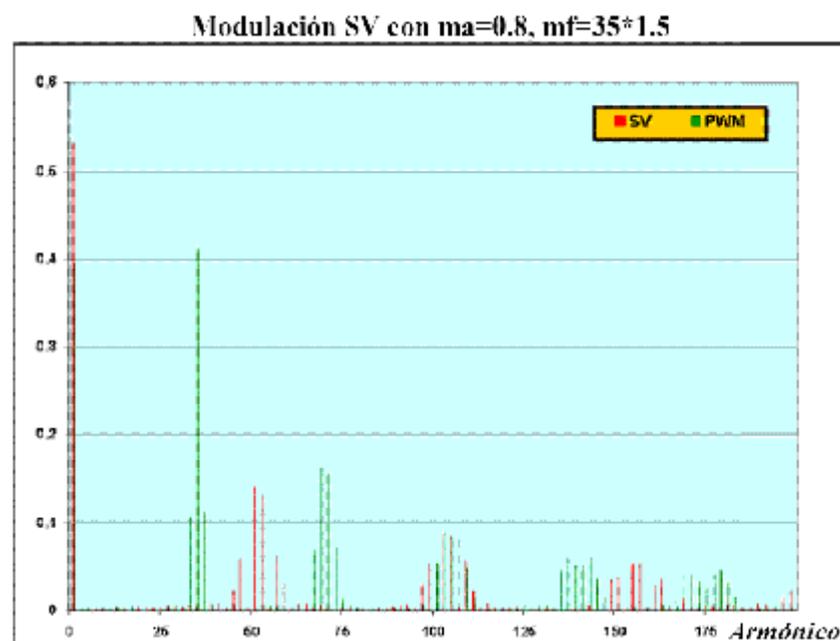


Ilustración 35. Armónicos de las estrategias PWM y SVM

Si realizamos un análisis de la distorsión armónica total (THD) en cada caso, considerando los armónicos que se muestran de la figura 34, observamos cuantitativamente las mejoras alcanzadas haciendo uso del método de modulación SVM respecto al PWM senoidal.

4.3.3 Método de modulación por control de vectores

Esta técnica de control, está basada en la modulación vectorial SVM, sin embargo, a diferencia de esta última, SVC trabaja con frecuencias de conmutación bajas y no genera el valor medio de la tensión de carga deseada en cualquier intervalo de

conmutación a partir de los tres vectores más próximos al vector de referencia. La base fundamental de este método se centra en proporcionar a la carga un vector de tensión que minimice el error espacial o la distancia al vector de referencia.

El método resulta simple y atractivo cuando trabajamos con convertidores multinivel de elevado número de niveles de tensión, dado que la alta densidad de estados generará pequeños errores respecto al vector de referencia. Sin embargo, cuando el número de niveles decrece, el error se incrementa y el rizado de la corriente aumenta. La utilización de este método de modulación en convertidores de tres niveles, que es el convertidor más ampliamente extendido en aplicaciones industriales, no es recomendable. Por lo tanto, resulta útil y necesario desarrollar algoritmos de modulación que no incrementen mucho la complejidad del control de conmutación y que permitan la obtención del vector de referencia de forma precisa. En el capítulo próximo de esta memoria se explicarán en detalle los algoritmos simples y efectivos de modulación SVPWM que proponemos y que suponen la base de las aportaciones de este trabajo en el ámbito de los esquemas de modulación vectorial.

4.3.4 Método de modulación por cancelación selectiva de armónicos

En general, este método se basa en eliminar los armónicos de baja frecuencia más significativos seleccionando de forma adecuada los ángulos de conmutación en la forma de onda de la tensión escalonada. Las componentes armónicas de alta frecuencia se pueden eliminar utilizando filtros adicionales.

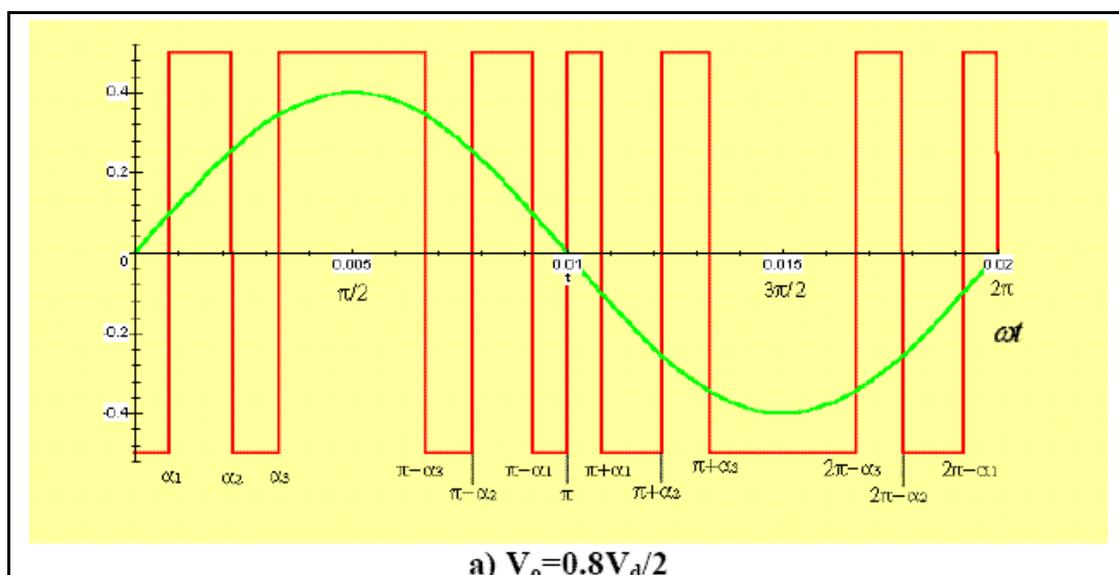


Ilustración 36. Modulación por cancelación selectiva de armónicos

La figura 36 muestra una forma de onda genérica con simetría de cuarto período, donde se tiene m ángulos de conmutación ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$). Aplicando el desarrollo en serie de Fourier a esta señal y escogiendo apropiadamente los m ángulos de conmutación se puede cancelar hasta $m-1$ armónicos, reservando un grado de libertad para regular la amplitud del armónico fundamental. En general, se suele escoger la cancelación de los armónicos más significativos de baja frecuencia. Para conseguir la cancelación efectiva de los armónicos, los m ángulos de conmutación ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$) deben estar comprendidos entre 0 y $\pi/2$, lo que supone que el margen del índice de modulación disponible suele ser estrecho, lo que supone una limitación de este tipo de modulación.

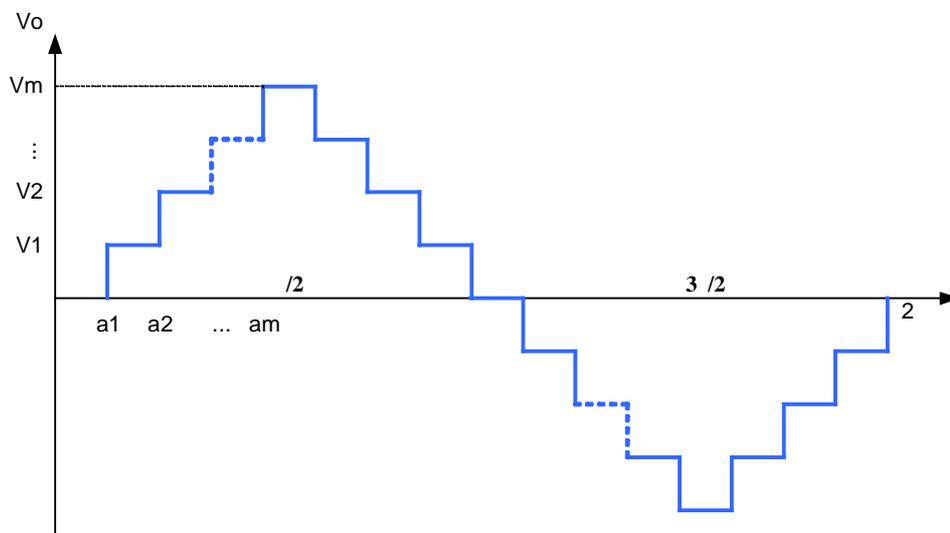


Ilustración 37. Tensión de salida escalonada generalizada a m ángulos de conmutación

Por tanto, la principal desventaja que presenta esta estrategia de modulación es el estrecho rango del índice de modulación que presenta, con la consecuente reducción de las componentes que se pueden eliminar y dando lugar, por tanto, a un significativo incremento en la distorsión armónica total. En la actualidad se pueden encontrar documentos en los cuales han propuesto unos esquemas de modulación de eliminación armónica selectiva generalizada con el objetivo de alcanzar mayores rangos de índice de modulación minimizando la distorsión armónica total.

4.4 Ejemplos de convertidores CC/CA trinivel comerciales

En este apartado se muestran dos modelos de inversores de tres niveles con configuración NPC comerciales más importantes que actualmente se pueden encontrar en el mercado. El primer modelo está fabricado por ABB, concretamente se trata del modelo **ACS 1000**. Posteriormente se muestra el modelo fabricado por la empresa Siemens, el modelo **Simovert MV**.

4.4.1 Modelo ACS 1000 de ABB

Se trata de un dispositivo de control de motores de inducción de media potencia formado por una etapa de rectificación y una etapa de inversión constituida por un inversor de tres niveles **NPC**.

Existen dos modelos topológicamente idénticos que sólo se diferencian en el tipo de refrigeración. El primero está refrigerado con aire, con una potencia nominal que va desde *315 kW* hasta *1,8 MW*, mientras que el segundo se refrigera con agua con un rango de potencia que va desde *1,8 MW* hasta *5MW*. A continuación se muestran los dos modelos, la primera figura corresponde a la fotografía del modelo refrigerado por aire y la segunda figura corresponde a la fotografía del modelo refrigerado por agua.

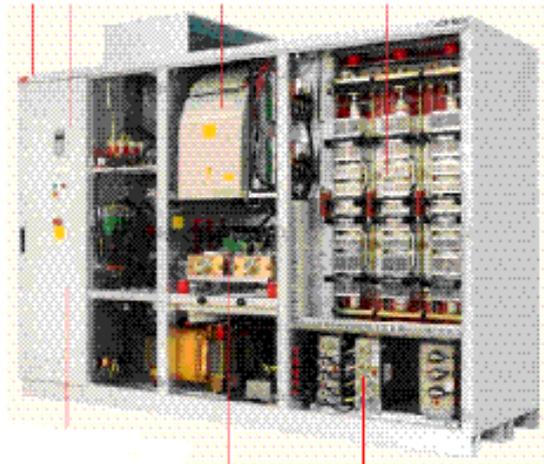


Ilustración 38. Modelo ACS 1000 de ABB refrigerado por aire.

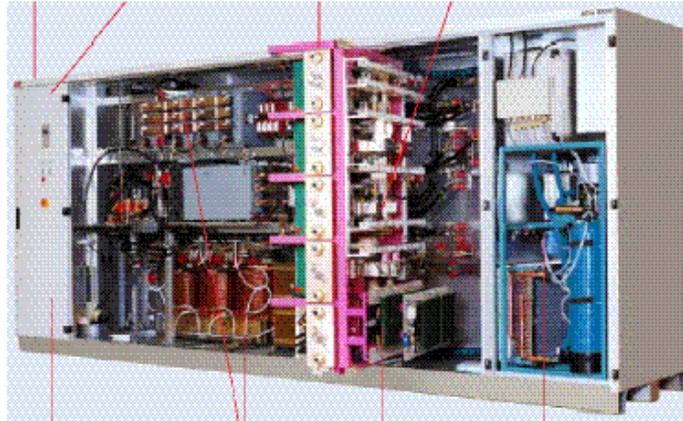


Ilustración 39. Modelo ACS 1000 de ABB refrigerado por agua.

La señal de salida que se obtiene una onda senoidal de hasta 4,0 kV capaz de alimentar directamente a un motor asíncrono estándar sin necesidad de añadir ningún filtro adicional, gracias a su filtro LC incorporado. La frecuencia de la tensión de salida es regulable hasta un valor de 66 Hz y la eficiencia del dispositivo es muy elevada, aproximadamente del 98,5%, según el fabricante.

4.4.2 Modelo Simovert MV de Siemens

El inversor Simovert MV es un dispositivo muy similar al ACS 1000 de ABB, con un rango de potencias entre 660 kVA y 9100 kVA para tensiones de salida desde 2,3 kV hasta 6,6 kV. Está constituido por una primera etapa de rectificación, seguida de una etapa de inversión, con un inversor de tres niveles en configuración **NPC**. A diferencia del inversor anterior, el modelo Simovert MV no incluye un filtro de salida ya que, según el fabricante, se pueden conectar directamente a los motores Siemens gracias a que la tecnología de tres niveles lo permite. La figura 39 muestra el Simovert MV.



Ilustración 40. Modelo Simovert MV de Siemens.

5. EQUILIBRADO DE TENSIONES DEL PUNTO MEDIO DE CONVERTIDORES MULTINIVEL DCM

El problema del equilibrado de las tensiones de los condensadores ha centrado la atención de muchos investigadores en los últimos años. Se han desarrollado una gran variedad de estrategias para resolver este problema. Sin embargo, la mayoría de estos métodos se basan en añadir una componente de tensión de secuencia cero a la tensión de salida o bien en manipular los vectores de conmutación redundantes aplicando alguna estrategia de control vectorial. En este sentido, normalmente se eligen convenientemente los vectores dobles o redundantes de tal forma que tiendan a cargar o descargar los condensadores para lograr el equilibrado de las tensiones de continua. Esta técnica precisa medir las tensiones de los condensadores en cada instante así como el sentido de la intensidad en el punto medio. Por otro lado, el equilibrado de las tensiones presenta además, ciertas limitaciones con relación al índice máximo de modulación utilizable o al incremento de las pérdidas de conmutación del convertidor.

Aunque las técnicas de modulación basadas en redundancia de vectores de estado evitan la necesidad de utilizar circuitería adicional, sin embargo, presentan el inconveniente de incrementar las pérdidas de conmutación, efecto nada deseado en aplicaciones de gran potencia.

Se demuestran que es imposible equilibrar las tensiones de los condensadores en todas las condiciones de operación sin añadir circuitos de control auxiliares, mediante componentes activos o pasivos adicionales, en aquellos sistemas de topología multinivel que involucren una etapa de conversión simple: DC/AC o AC/DC. Por lo tanto, en este trabajo vamos a centrar nuestro análisis en convertidores de tres niveles y conversión de potencia AC/DC/AC sobre sistemas de energía eólica de inyección de potencia en red llevada a cabo mediante la conexión espalda contra espalda de un rectificador con un inversor de tres niveles considerando una carga trifásica equilibrada. De este modo será posible equilibrar las tensiones de los condensadores y minimizar el número de conmutaciones utilizando una determinada estrategia de control, además de permitir corregir el factor de potencia y mejorar el contenido armónico.



Un requerimiento fundamental del control de un convertidor de tres niveles es mantener la tensión del punto medio en un valor cercano a la mitad de la tensión de continua. Si embargo, este objetivo no se puede alcanzar cuando operamos con índices de modulación altos, y principalmente cuando conectamos una carga con factor de potencia reducido. Bajo tales condiciones, el valor promedio de la corriente del punto medio, calculada sobre un periodo de modulación, no se puede mantener a cero. Por este motivo, aparece un rizado de baja frecuencia en la tensión del punto neutro. Si el algoritmo de modulación SVPWM (Space Vector Modulation) no considera este desequilibrio, la tensión de línea de salida contendrá armónicos de baja frecuencia de orden par e impar y como consecuencia de esto, dichos armónicos degradarán el funcionamiento de la carga constituyendo un problema de gran importancia en los sistemas eólicos de conexión a la red eléctrica de distribución. En se presentan técnicas para compensar las perturbaciones en la carga ocasionadas por cualquier desequilibrio en la tensión de continua que se propaga hasta la salida del convertidor.

Por lo tanto, existen dos problemas asociados a la tensión del punto medio del convertidor de tres niveles NPC:

- I. El rizado de baja frecuencia, triple de la frecuencia fundamental, que aparece en la tensión del punto neutro si utilizamos elevados índices de modulación. Existen técnicas de equilibrado para reducir esta tensión pero con limitaciones en la cantidad máxima que se puede reducir. Este problema parece ser inherente a la topología DCM.
- II. Los desequilibrios del punto medio en régimen estacionario que pueden ser debidos a transitorios y otras no linealidades y desequilibrios. Además, aunque la tensión de la fuente de continua sea estable si la corriente promedio del punto central es cero, esto no garantiza que las dos tensiones de los condensadores de la parte de continua sean iguales.

Una nueva estrategia de modulación SVPWM evita la distorsión de baja frecuencia en la tensión de salida de un convertidor NPC de tres niveles. En general, los estados de conmutación de un convertidor de tres niveles presentan distintos efectos sobre el punto medio. En la figura 40 se muestran los vectores de estado de un convertidor trinivel.

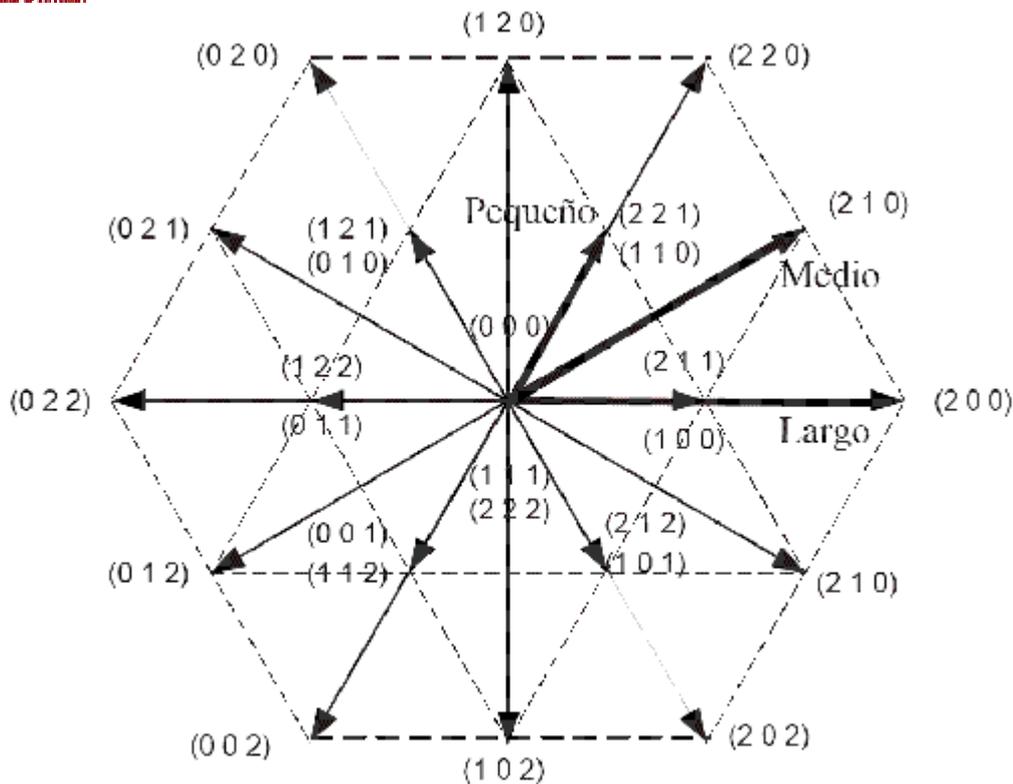


Ilustración 41. Vectores de estado de conmutación de un convertidor trinivel

Los vectores llamados *largos* no afectan a la estabilidad del punto neutro, los vectores *medios* pueden causar desequilibrios y su efecto no es controlable, ya que tan sólo dependen de los tiempos de conmutación o **duty cycles** y del factor de potencia de la carga. Es decir, por el punto neutro fluirá una corriente igual a la corriente de fase durante el tiempo correspondiente. Por tanto, los únicos vectores controlables son los llamados vectores *pequeños* o estados redundantes, presentando cada uno de estos una función de conmutación positiva y otra negativa, dando lugar al correspondiente cambio de signo de la corriente de fase.

Se demuestra que es posible conseguir un equilibrio natural en convertidores triniveles **NPC** controlados vectorialmente utilizando la selección de vectores pequeños. La efectividad de estos mecanismos de equilibrado radica en la técnica de modulación, en los armónicos de las funciones de conmutación y en la impedancia de la carga.

Cuando se introdujo la técnica de modulación SVPWM (Space Vector Modulation), se indicó la existencia de estados redundantes en convertidores de tres o más niveles. Dichos estados presentan idénticas diferencias de tensión entre cada fase aunque no lo sea el potencial eléctrico de cada una de ellas por separado, por ello desde el punto de vista de la carga son equivalentes. Sin embargo, dichos estados no son

equivalentes desde el punto de vista de la parte de continua, ya que en función de las intensidades de fase los condensadores del embarrado de continua se cargarán con unos estados y se descargarán con otros. Esta equivalencia, desde el punto de vista de la carga pero no desde el punto de vista del embarrado de continua, puede ser empleada para implementar un algoritmo que controle la tensión del punto medio sin afectar al resultado en la carga. En la figura 41 se presenta el primer sextante del plano transformado d-q, en el cual se aprecia que el vector de estado nulo es triple, y que hay dos estados adicionales dobles.

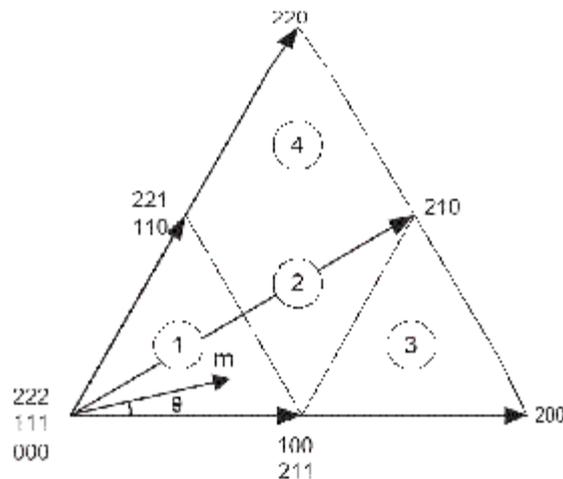


Ilustración 42. Primer sextante plano d-q para un inversor trifásico trinivel

En la figura 41 se observa que un estado es doble cuando se puede aumentar por igual la tensión de las tres fases. Por ejemplo, en el caso del estado 100, aumentando un nivel la tensión de cada fase se obtiene el estado 211, que efectivamente puede ser sintetizado por un inversor trinivel. La adecuada elección de los vectores dobles permite controlar la corriente del punto medio de los condensadores, y en consecuencia, el equilibrado de las tensiones de dichos condensadores cuando la carga es equilibrada.

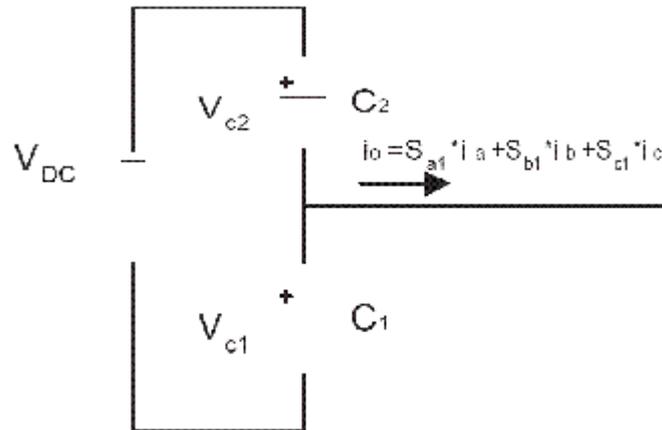


Ilustración 43. Sentido de flujo de la intensidad Id

Con el apoyo de la figura 42, se pone de manifiesto que, conocido el estado (funciones existenciales o de control) y las intensidades instantáneas de fase de la carga, es posible determinar el sentido de flujo de la intensidad i_0 . Este sentido junto con el desequilibrio de la tensión del punto medio, permiten obtener un criterio de decisión entre los estados dobles, de modo que se pueda controlar la carga o descarga del condensador correspondiente. De este modo suponiendo corrientes de salida del inversor sin discontinuidad (carácter inductivo de la carga, bobinas de alisamiento) y sin componente homopolar, se escogerán en cada ventana de integración los vectores dobles más adecuados para garantizar el equilibrado de las tensiones de los condensadores. El criterio de selección se hará en función del signo de la corriente de salida y del error en la tensión de los condensadores del embarrado de continua. Por ejemplo, supongamos que debemos escoger entre los vectores dobles 100 y 211. Si la intensidad i_a es positiva, se seleccionará el vector 100 para descargar el condensador C_1 , siendo $i_0 = i_a$, y el vector 211 para cargarlo ($i_0 = i_b + i_c = -i_a$). En la tabla 10 se muestran todas las reglas de decisión según este criterio. Normalmente, el procedimiento de elección del vector doble se incorpora, de forma adicional, al algoritmo de modulación vectorial que se implemente. Se suele optar por hacer este control de forma independiente con objeto de mostrar la independencia entre este control y el algoritmo de modulación del inversor, y por claridad en el desarrollo del código que lo implementa.

De esta manera, el procedimiento general a llevar a cabo al comienzo de cada ventana de integración será el siguiente:



- Ejecutar el algoritmo de modulación vectorial.
- Leer los valores de las intensidades y la tensión de uno de los condensadores.
- Determinar cuales de los tres estados proporcionados por el método de modulación es doble y en consecuencia susceptible de ser candidato para el control a realizar.
- Para cada uno de los estados determinados en el paso anterior y a partir de los datos obtenidos, determinar los signos de i_0 y de $v_1 - V_{DC}/2$, y en función de los mismos decidir qué vector ha de escogerse.

La modificación del algoritmo de modulación correspondiente para controlar la tensión del punto medio del embarrado de continua mediante la técnica propuesta tiene algunos inconvenientes ya que, por un lado, incrementa la carga computacional sobre el procesador digital que implementa el control del convertidor y, por otro, es necesario disponer de medidas en tiempo real sobre el sistema. En este caso se trata de disponer al menos de las medidas de la intensidad en el punto medio y de la tensión de los condensadores del embarrado de continua.

En el presente proyecto tan sólo incluiremos la estrategia de control para el equilibrado de tensiones en el inversor **NPC** de tres niveles operando independientemente, utilizando la adecuada selección de los estados dobles, considerando los valores medidos de intensidad en el punto neutro y la tensión de los condensadores. Dicha selección debe minimizar el número de conmutaciones y como consecuencia de esto, las pérdidas de conmutación.

En la tabla 10 se muestra el esquema de decisión de vectores dobles considerado para equilibrar la tensión de los condensadores, suponiendo que la tensión de la fuente de continua permanece estable.

Vectores dobles	V1	<u>Intensidad positiva/vector</u>	<u>Intensidad negativa/vector</u>
100-221	$V1 > V_{dc}/2$	la/100	la/211
	$V1 < V_{dc}/2$	la/211	la/100
110-221	$V1 > V_{dc}/2$	lc/221	lc/110
	$V1 < V_{dc}/2$	lc/110	lc/221
010-121	$V1 > V_{dc}/2$	lb/010	lb/121
	$V1 < V_{dc}/2$	lb/121	lb/010
011-122	$V1 > V_{dc}/2$	la/122	la/011
	$V1 < V_{dc}/2$	la/011	la/122
001-112	$V1 > V_{dc}/2$	lc/001	lc/112
	$V1 < V_{dc}/2$	lc/112	lc/001
101-212	$V1 > V_{dc}/2$	lb/212	lb/101
	$V1 < V_{dc}/2$	lb/101	lb/212

Tabla 10. Reglas de decisión para controlar tensión del punto neutro.

6. MODELADOS DEL SISTEMA

Las presentes simulaciones, y por tanto, todas las gráficas con los valores y señales obtenidas que se muestran a continuación se han realizado en el entorno de simulación del programa descrito en el ANEXO I.

En este apartado de la memoria técnica del presente proyecto se intentará, mediante simulaciones y representaciones gráficas o numéricas, dar una visión favorable de la respuesta de un aerogenerador con un convertidor CC/CA multinivel en su sistema de acondicionamiento de potencia frente a un aerogenerador actual con un convertidor CC/CA de dos niveles, tanto desde el punto de vista económico como funcional de inyección de potencia en una red de distribución.

Ambos beneficios se utilizarán, o se expondrán como prueba, en un primer punto como respuesta a la utilización de convertidores CC/CA multinivel en sistemas de energía eólica, dando de este modo a estos sistemas una nueva entrada de penetración hacia la competitividad en el sector de sistemas de producción energética.

En un segundo punto, el área de las innovaciones y desarrollos tecnológicos se verá reforzado para impulsar los sistemas eólicos como alternativa a los actuales sistemas de producción energéticas contaminantes, debido a la creciente demanda energética y a la fuerte dependencia actual del petróleo.



6.1 Modelado del aerogenerador de dos niveles

Este modelado será el mismo para todas las simulaciones, se supondrá que todos los aspectos puramente externos a la electrónica y el flujo de potencia eléctrica desde las palas del aerogenerador hasta la inyección en red son exactamente iguales, por tanto según se vayan mostrando resultados y simulaciones se irá describiendo los cambios de topología respecto al sistema de acondicionamiento de potencia.

También merece una relevante mención, que la utilización de convertidores CC/CA multinivel involucra el uso de nuevos componentes (mayor número de dispositivos de disparo, diodos, condensadores, etc) o la supresión de parte de la topología electrónica del aerogenerador (como ya veremos, con la utilización de convertidores CC/CA multinivel no será necesario elevar la tensión del bus de continua o DC-Link) o cambio de características de diseño en mismos componentes. Respecto a todo esto, se intentará explicar con todo detalle cualquier cambio de topología o característica de diseño, mejora o desventaja, que se realizarán para las simulaciones.

En primer lugar veamos una captura general del modelo del aerogenerador que se quiere simular como generador de potencia eléctrica para inyectarla en una red eléctrica de distribución.

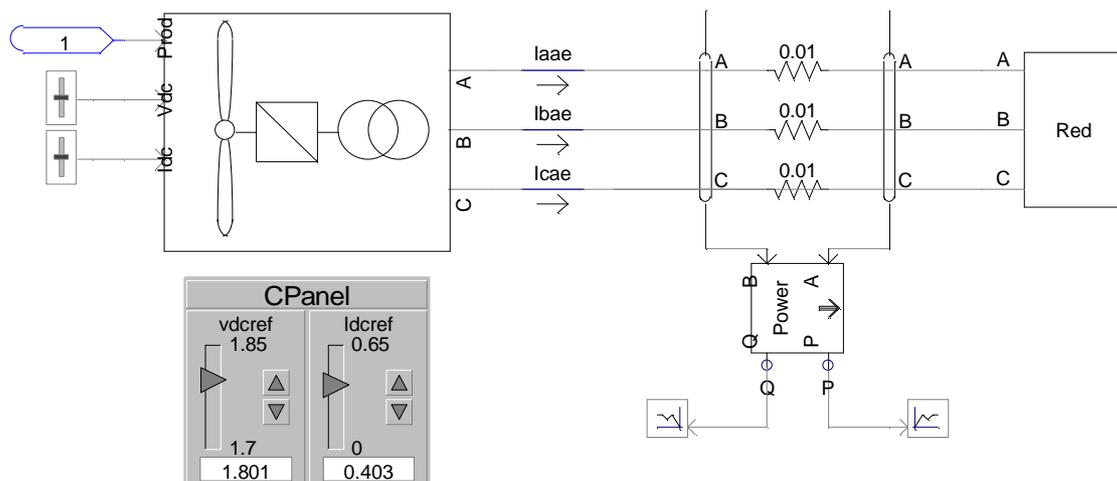


Ilustración 44. Captura general de un aerogenerador de inyección a red

En esta captura podemos ver la caja que envuelve el funcionamiento electrónico del aerogenerador donde tenemos como únicas entradas la tensión de referencia del bus de continua del DC-Link estudiado en el punto 2.2 de partes de un aerogenerador como la corriente de referencia de entrada en el convertidor CC/CA.

Como únicas salidas obtenemos las corrientes trifásicas que serán inyectadas en red. También podemos ver un componente “power” que nos calcula tanto la potencia activa P como la potencia reactiva Q de la potencia total S inyectada por el aerogenerador en la red de distribución, complaciente con la expresión:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Ecuación 9. Potencia total en función de la potencia activa y reactiva

Para damos cuenta de las ventajas de los convertidores CC/CA multinivel para sistemas de energía eólica, se han realizado “a priori” simulaciones referentes a un modelado de un aerogenerador con un convertidor CC/CA trifásico de puente completo de dos niveles, el cuál es el que funciona en los parques eólicos actuales, estudiado en el punto 3.1.2 de la memoria justificativa del presente proyecto.

A continuación se muestra el sistema electrónico de potencia de los sistemas eólicos actuales (con convertidores CC/CA de dos niveles).

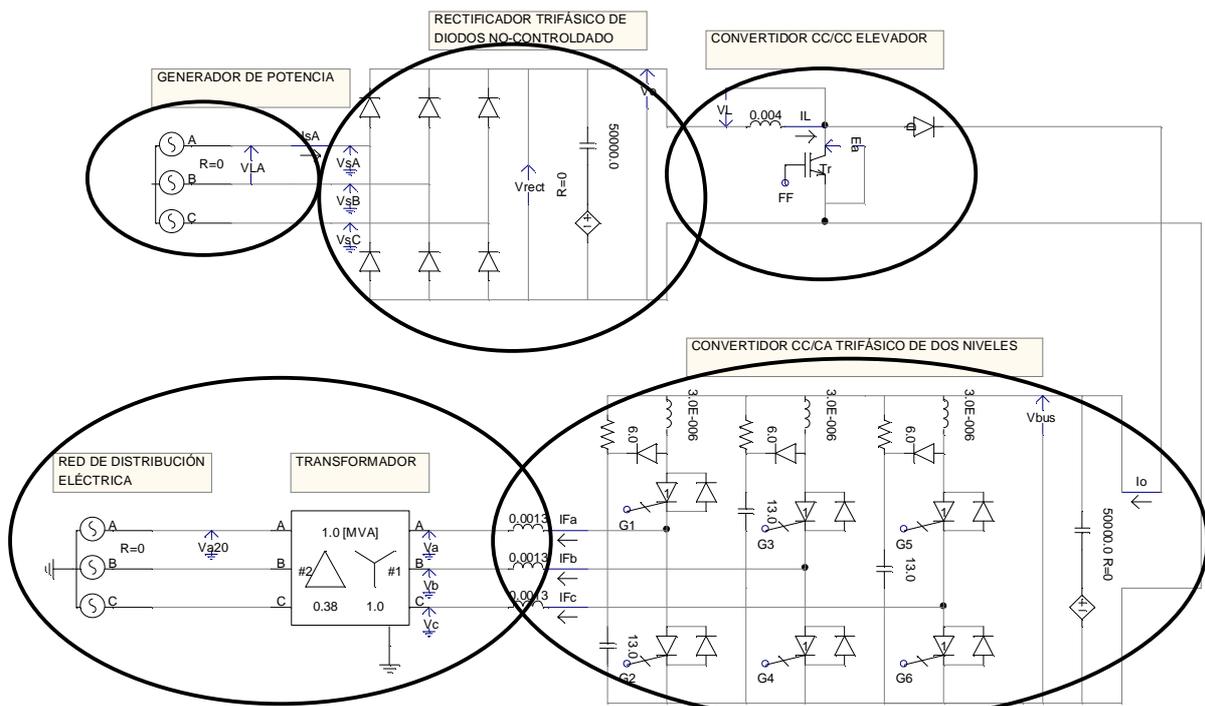


Ilustración 45. Captura de simulación del sistema electrónico de dos niveles de un aerogenerador



Aunque ya en el apartado de sistemas electrónicos de acondicionamiento de potencia se hace una descripción de las partes que lo constituyen, en la figura anterior se reflejan las distintas partes del aerogenerador simulado.

En primer lugar tenemos el generador eléctrico de potencia con las siguientes características,

CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA DEL GENERADOR EÓLICO	
(En este apartado se simula como una fuente ideal trifásica de tensión)	
Tensión generada	1800 voltios RMS
Frecuencia	50 Hz
Potencia generada	1,8 MW

Tabla 11. Características del generador eólico simulado

Seguidamente tenemos el rectificador de diodos no controlado con una tensión de salida $V_o = 2200$ voltios. Justo detrás se encuentra un convertidor CC/CA elevador con una tensión de salida $V_{bus} = 3000$ voltios. En el apartado 7 se mostrarán ambas tensiones simuladas.

Una vez que tenemos la tensión del bus o DC-Link controlado a 3000 voltios que funciona de fuente de tensión de entrada del convertidor CC/CA trifásico de dos niveles, a la salida obtendremos la simulación de las corrientes reales siguiendo a sus corriente de referencia. La simulación para la fase A y las fases B y C son idénticas.

A continuación, se encuentra el filtro de bobinas para el alisamiento de las corrientes de salida generadas por el convertidor CC/CA trifásico, un transformador trifásico de 2 MVA de tensión de línea de 1000 voltios a tensión de salida de 380 voltios. Por último, tenemos la red eléctrica a 380 voltios y 50 Hz.

Control analógico de los disparos de los interruptores del inversor de dos niveles:

El control que se ha realizado para el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de potencia con un inversor de dos niveles es el ya estudiado en el apartado 3.3 de la memoria justificativa del presente proyecto, control **PWM**.

Cálculo de la potencia generada a la salida del sistema de acondicionamiento de potencia Pot y comparada con la potencia de referencia a generar por nuestro aerogenerador P_{ref} ,

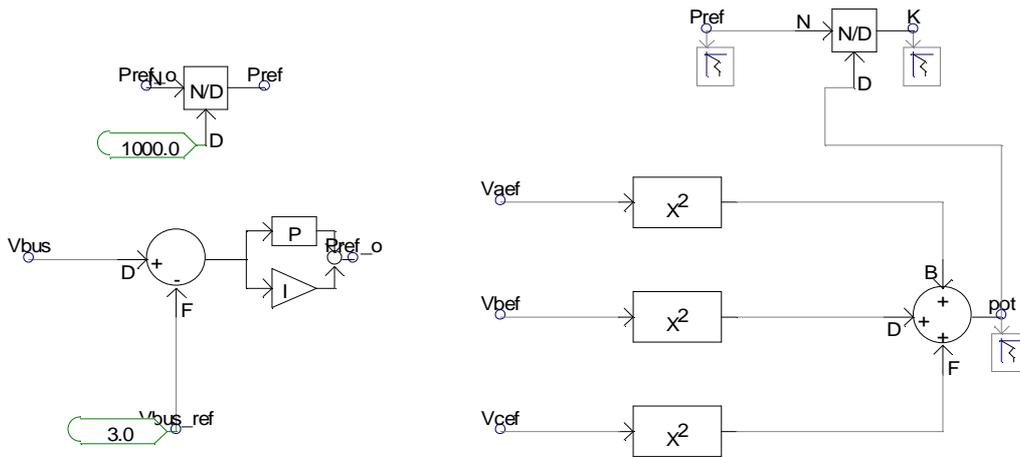


Ilustración 46. Relación de potencias para aerogenerador de dos niveles

A continuación se muestra el diagrama de bloques y señales del sistema de control del inversor trifásico de dos niveles.

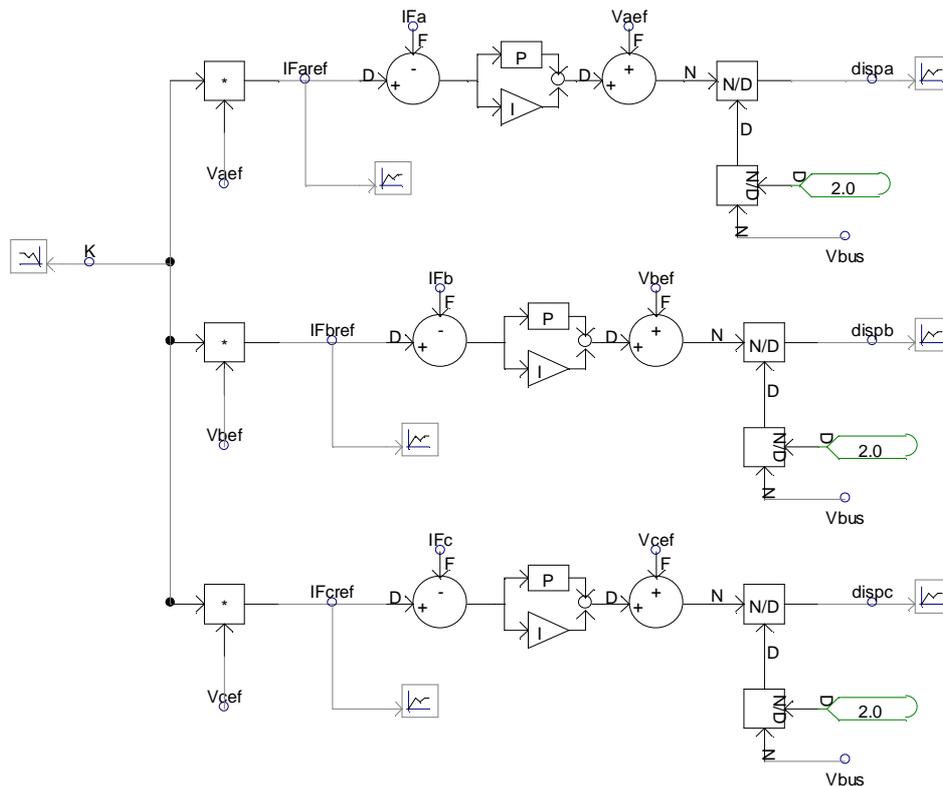


Ilustración 47. Control analógico del aerogenerador de dos niveles

El valor K calculado por la diferencia entre la potencia de referencia y la potencia generada, sirve de consigna a nuestro sistema de control del inversor. Como podemos apreciar esa consigna se multiplica por la tensión de salida del inversor, previamente filtrada V_{aef} , y nos da como resultado la corriente de referencia de nuestro sistema I_{Faref} . Dicha corriente es comparada con la corriente calculada a la salida del inversor y el error resultante sirve de entrada al control PI.

El valor de salida del control PI se suma la tensión de referencia V_{aef} , y posteriormente se divide por la mitad de la tensión de bus. La señal resultante $dispa$ es la senoide de control para la primera rama o rama A del inversor de dos niveles.

De la misma manera se realiza el control para las otras dos ramas del inversor obteniendo las señales de control $dispb$ y $dispc$ respectivamente. Finalmente, las señales de disparo por ancho de pulso de los interruptores de las tres ramas del inversor de dos niveles se obtienen comparando las señales de control resultantes del sistema de control y comparadas con una señal triangular de frecuencia 1000Hz y un Duty cycle del 50%.

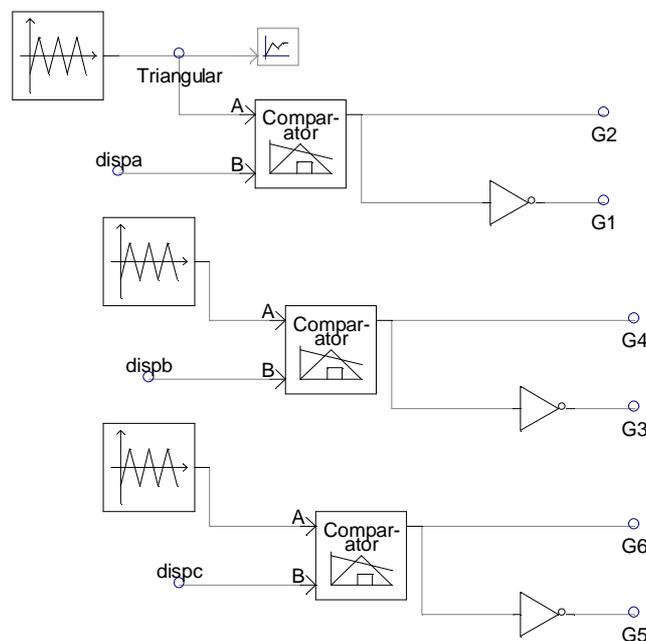


Ilustración 48. Obtención de las señales de disparo PWM

Mediante la consigna de actuación del comparador se obtienen las seis señales de disparo por ancho de pulso. Como se puede apreciar en el modelado de la figura 47 las señales de disparo en una misma rama están negadas una respecto a la otra debido a que no puede haber dos interruptores cerrados al mismo tiempo en una

misma rama, como ya se explicó en la memoria justificativa de este proyecto. En la figura 48 se muestra la generación de las señales de disparo de conmutación de la rama A del inversor mediante la comparación de las señales anteriores,

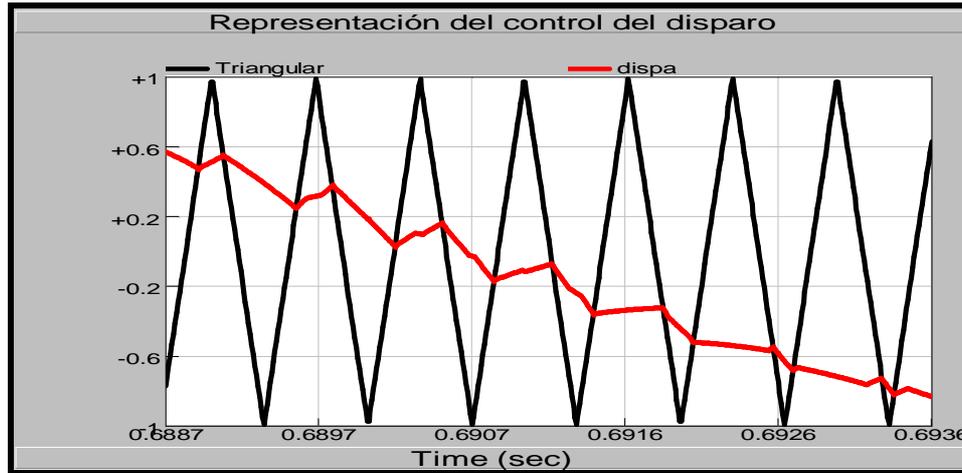


Ilustración 49. Generación de las señales de conmutación G1 y G2

Este modelado del sistema de acondicionamiento de potencia de dos niveles incluye un elevador-chopper que eleva la tensión de salida rectificada del rectificador de diodos a una tensión mayor llamada tensión de bus o DC-LINK, veamos a continuación en la figura 49 el modelado del control de corriente demandada por el chopper,

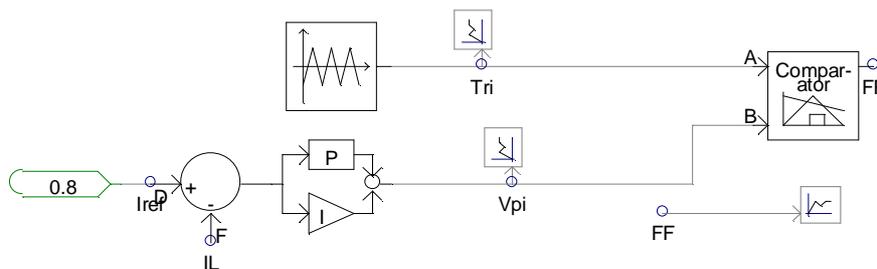


Ilustración 50. Control de la corriente demandada por el elevador

Este control compara la corriente de referencia marcada por la aeroturbina y la corriente real, el error obtenido entra en un control PI y el resultado es la consigna de control sobre la triangular. El bloque de comparación entre ambas señales da la señal de disparo por ancho de pulso del interruptor de la configuración elevadora. A continuación se muestra el control de la corriente del elevador para una potencia de $P \cong 1,8$ MW a la tensión de $V_o = 2200$ voltios y a los valores esperados por el control,

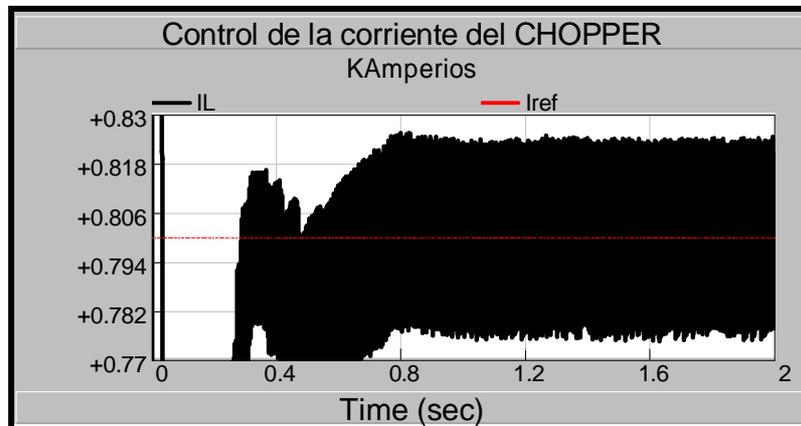


Ilustración 51. Control de corriente por el elevador

Para garantizar la calidad de onda inyectada en la red eléctrica y de este modo no contribuir a la desestabilidad de la propia red, se generan normas de calidad en el ámbito estatal e internacional con baremos a cumplir de valores máximos de armónicos y THD en tantos por ciento. Para ello, en el entorno de simulación PSCAD también se ha realizado un estudio de los armónicos y THD producido por los diferentes modelados simulados, con el correspondiente estudio de comparación entre los resultados obtenido y su posterior conclusión al nivel de cumplimientos, calidad de onda generada, penalizaciones, ahorro en filtros a la salida, etc.

Se muestra a continuación las capturas de los bloques realizados en el entorno de simulación PSCAD para la obtención y el posterior estudio de los armónicos y THD de las diferentes topologías.

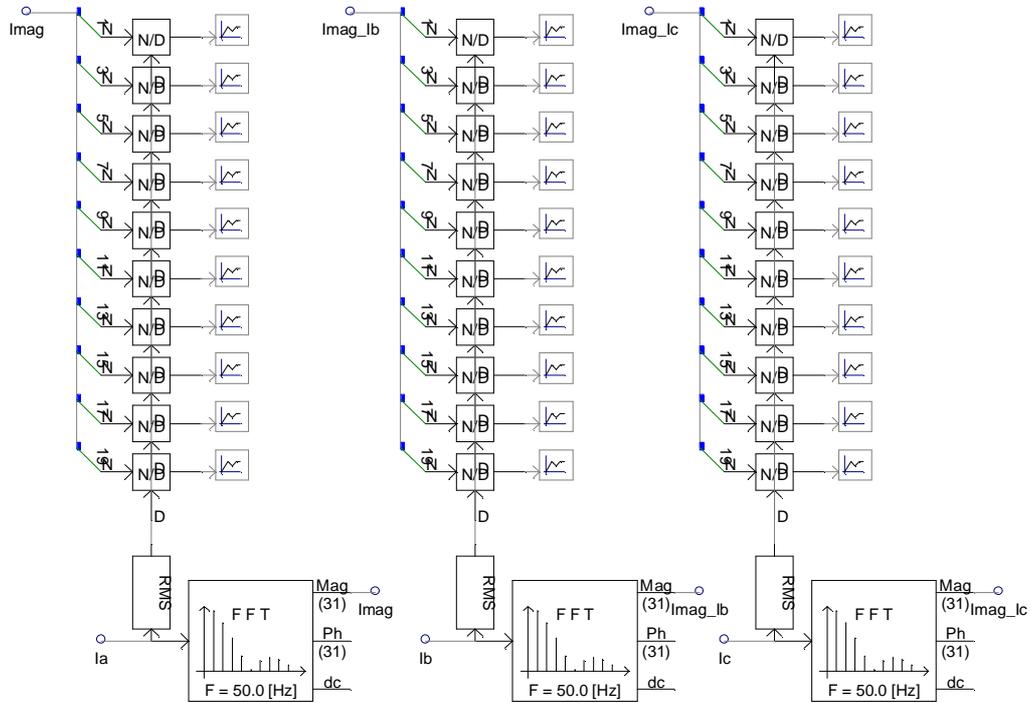


Ilustración 52. FFT y armónicos de las corrientes de salida

Bloques de generación, en tanto por ciento, de la distorsión total armónica THD de las señales de salida del sistema acondicionador de potencia,

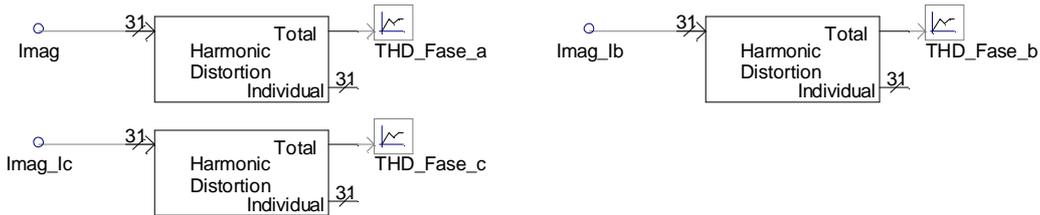


Ilustración 53. Bloques de cálculo de distorsión armónica THD

Este apartado 6.1 de la memoria técnica, es decir, el modelado de un sistema de acondicionamiento de potencia con inversores de dos niveles para aerogeneradores de grandes potencias 1,8 MW sirve como punto de partida hacia el modelado final del proyecto.

El modelado final del proyecto estará formado por el modelado de la parte mecánica más generador eléctrico de inducción auto-excitado de un aerogenerador y el modelado de un sistema de acondicionamiento de potencia con un inversor trinivel. En el siguiente apartado se muestra y describe el modelado del sistema mecánico más generador eléctrico simulado y utilizado en este proyecto.



6.2 Modelado del generador eléctrico eólico

6.2.1 Introducción

La topología empleada para convertir la energía mecánica procedente del viento en energía eléctrica condiciona directamente el comportamiento de la turbina en cuanto a su velocidad de rotación. Los generadores para turbinas eólicas pueden ser de diferentes tipos. Históricamente, el generador de inducción de jaula de ardilla fue el más implementado; posteriormente, se utilizó el generador de inducción de rotor bobinado o doblemente alimentado para llegar a las tendencias actuales que se encaminan a generadores síncronos multipolos, eliminando la engorrosa multiplicadora del sistema de transmisión.

Los generadores asíncronos o de inducción que se utilizan en aerogeneradores son tanto de rotor bobinado como de jaula (doblemente alimentados), comercialmente son los más predominantes y fueron los que primeros que se implementaron. El generador de inducción es comúnmente usado en turbinas eólicas o aeroturbinas para generación de electricidad debido a su menor coste, robustez, construcción del rotor y fácil mantenimiento.

La función principal del devanado trifásico del estator es magnetizar la máquina y suministrar la corriente generada. Por los devanados del rotor (o barras en caso de rotor de jaula) en cambio, sólo circula la corriente inducida. Cuando la excitación externa está presente, el campo magnético del estator gira a la velocidad síncrona, impuesta por la pulsación de las corrientes de excitación provenientes de la red ($2\pi f$) que atraviesan el devanado del estator, dividida por los pares de polos (p).

$$W_s = \frac{2pf}{p} \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Ecuación 10. Velocidad síncrona nominal de la máquina de inducción

De este modo, para que la máquina de inducción funcione como un generador, los terminales del estator deben estar conectados a una fuente de tensión de frecuencia constante y el rotor debe ser conducido por una consigna de velocidad de sincronismo ($s < 0$).

Las velocidades síncronas nominales según los polos de la máquina están desglosadas en la tabla 12,

Nº de POLOS	VELOCIDAD SÍNCRONA A 50 Hz
2	3000 rpm
4	1500 rpm
6	1000 rpm
8	750 rpm
10	600 rpm
12	500 rpm

Tabla 12. Velocidades síncronas - nº de polos de la máquina

Para un generador de 4 polos a 50 Hz, la velocidad síncrona se corresponde a 1500 rpm según la ecuación 6,

$$n_s = \frac{120f}{p} [rpm]$$

Ecuación 11. Velocidad síncrona nominal de la máquina de inducción

El campo magnético del rotor se mueve a la misma velocidad que el del estator, es decir a la de sincronismo, independientemente de que el rotor esté bloqueado o girando a cualquier velocidad. Si el rotor del generador girase a la velocidad de sincronismo, los devanados del estator no percibirían variación de flujo magnético y en consecuencia tampoco habría corrientes inducidas en el estator. Lo que sucede es que el rotor queda deslizado respecto al campo magnético del estator que gira a la velocidad de sincronismo y funcionando como generador, el rotor girará a una velocidad un poco superior a la de sincronismo, como se puede apreciar en la ecuación 12,

$$n = (1 - s) \cdot n_s [rpm]$$

Ecuación 12. Velocidad del rotor respecto al deslizamiento

donde n es la velocidad del rotor y s el valor del deslizamiento de la máquina asíncrona.

La siguiente figura 53 muestra el par T frente a la variación del deslizamiento s de una máquina de inducción,

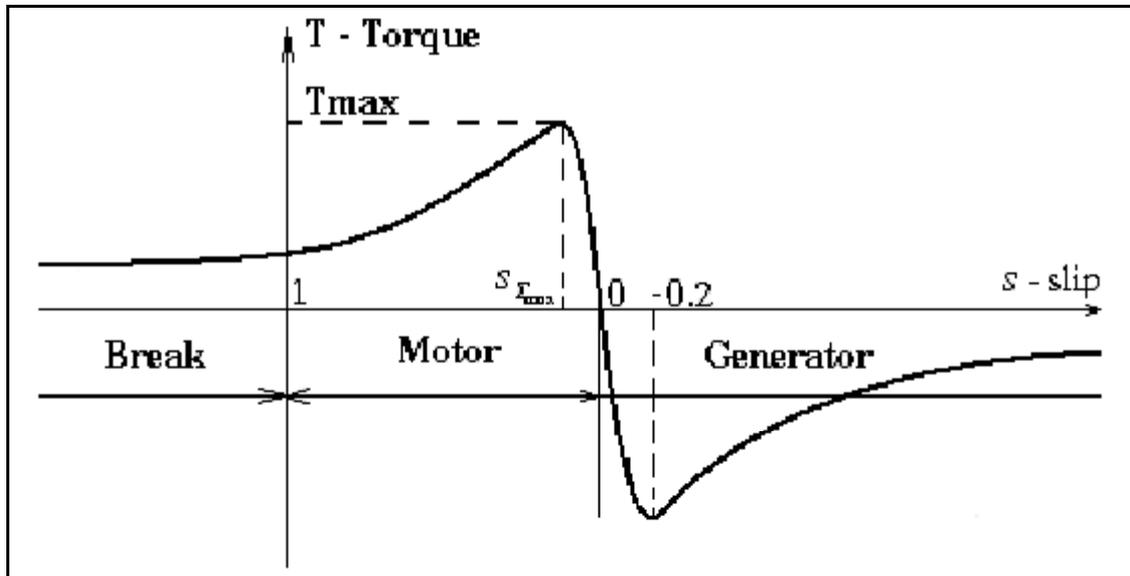


Ilustración 54. Curva de una máquina de inducción

Viendo la curva podemos observar que para valores de deslizamiento y par negativo la máquina de inducción se comporta como un generador de energía eléctrica y en caso contrario, con un deslizamiento y par positivo la máquina se comporta como motor.

Después de ver el comportamiento de una máquina de inducción, en la figura 54 se muestra el circuito equivalente eléctrico de una máquina de inducción donde se presentan sus parámetros más relevantes,

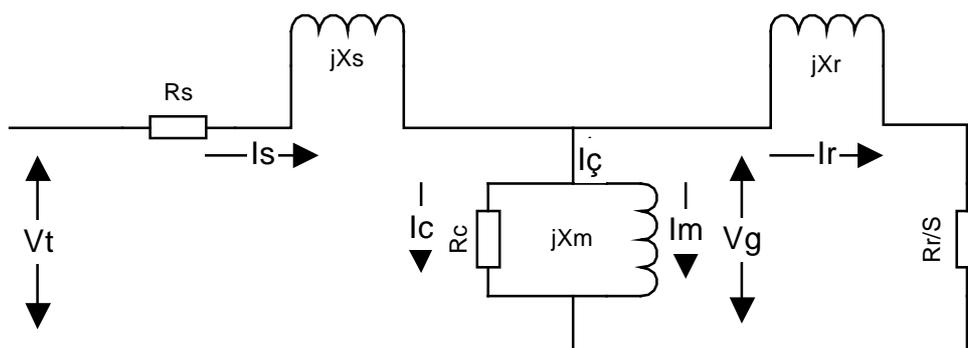


Ilustración 55. Circuito equivalente por fase de una máquina de inducción

Si nos centramos en el modelado del generador eólico del presente proyecto, nuestro sistema se compone de dos bloques bien diferenciados, el módulo mecánico eólico y el generador de inducción auto-excitado.



6.2.2 Módulo mecánico eólico

En este apartado se intenta simular el funcionamiento mecánico del aerogenerador, es decir, la captación de energía mediante el movimiento mecánico de las palas del aerogenerador según la velocidad del viento incidente en ese instante.

Particularmente, y como se ha realizado en este proyecto, el módulo mecánico eólico obtiene la velocidad de sincronismo (p.u.) por la que se conduce la máquina de inducción auto-excitada en función de la velocidad del viento (m/s) incidente en las palas. Se puede apreciar el módulo creado en PSCAD en la figura 55.

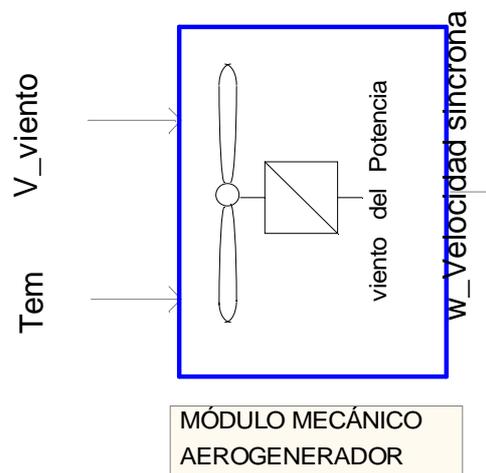


Ilustración 56. Módulo mecánico eólico en PS-CAD

Para ello, el módulo mecánico eólico calcula el factor C_p en función de los parámetros λ (relación de velocidades) y β (paso de pala) de acuerdo a la curva de la ilustración 2 del inicio de esta memoria. Una vez obtenido el factor C_p se calcula la velocidad angular de sincronismo teniendo en cuenta el par ejercido por la turbina, el par en el eje, el par eléctrico ejercido por la máquina, la inercia del generador y el amortiguamiento de la turbina.

Los valores de los parámetros más importantes a considerar en el cálculo de la velocidad de consigna de la máquina de inducción se muestran a continuación,

PARÁMETROS	VALOR
Radio de pala	37 m
Relacion de multiplicacion	87,7 m
Densidad del aire	1,125 Kg/m3



Nº_pares_polos	4
Velocidad de referencia	1500 rpm
Angulo de pala	0°

Tabla 13. Parámetros de módulo mecánico eólico

Para usar la velocidad angular como consigna de velocidad en el generador de inducción de nuestro modelo de PSCAD hay que expresarlo por unidad, multiplicando por el número de pares de polos y dividiendo entre la frecuencia angular base.

$$W_{PU} = \frac{W \cdot p}{Wb} [p.u.]$$

Ecuación 13. Velocidad de consigna (p.u.) del generador de inducción

Donde $Wp = 2 \cdot \pi \cdot f = 314,16$ rad/seg

El control de la simulación del módulo mecánico eólico se ha realizado mediante código de programación con los parámetros anteriormente indicados en la tabla 13, de este modo, en el apartado 7 de “simulaciones y resultados obtenidos” se mostrarán los valores de la velocidad de consigna del generador de inducción respecto a la velocidad del viento obtenidos por el módulo. Posteriormente se describirá en el apartado 8 “algoritmos de modulación empleados” de una manera más detallada el código utilizado.

6.2.2 Generador de inducción auto-excitado

El modelo del generador de inducción estudiado anteriormente mediante circuitos eléctricos equivalentes viene modelado en el software PSCAD de la siguiente manera,

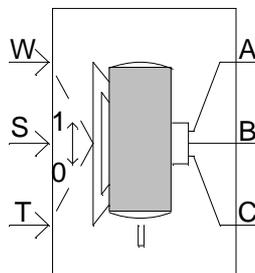


Ilustración 57. Modelo de máquina de inducción del PSCAD

Los valores de los parámetros que introducimos para modelar nuestro generador de inducción son los siguientes,

PARÁMETROS	VALOR
Voltaje	1800 Voltios
Corriente	1000 Amperios
Frecuencia angular base	314,16 rad/s
Potencia	1.8 MW

Tabla 14. Parámetros de la máquina de inducción

Una vez expuesta la tabla con todos los parámetros necesarios para las simulaciones y las consideraciones asumidas, la figura 57 muestra ya el sistema del generador eléctrico eólico completo, es decir, con el módulo mecánico el cuál proporciona la velocidad síncrona al generador de inducción según la velocidad del viento. Podemos observar en la figura que una fuente de tensión externa se ha conectado al terminal de estator del generador de inducción. Dicha fuente de tensión externa estará conectada hasta que el estado de operación esté listo, una vez que esto ocurra la fuente es desconectada mediante una señal de activación al circuito BRK.

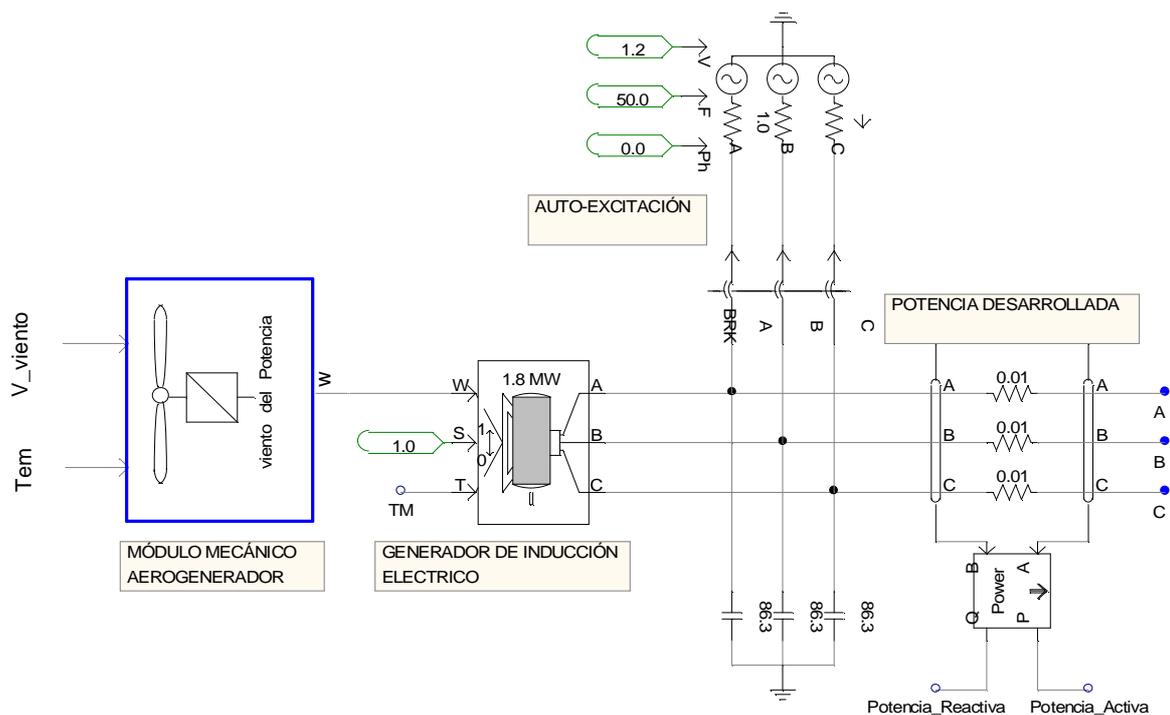


Ilustración 58. Sistema completo del generador eléctrico eólico

Se puede observar que la máquina de inducción es conducida a través de la velocidad de sincronismo (introduciendo un 1 por la señal de entrada S de la máquina de inducción) la cual es proporcionada por el módulo mecánico para que la máquina

funcione como generador eléctrico. Finalmente se puede observar un filtro trifásico conectado a los terminales del estator.

6.3 Modelado del Convertidor CC/CA Multinivel (trinivel)

En este apartado se muestra la captura del convertidor CC/CA trinivel, la topología es idéntica a la descrita en el apartado 4.1 del convertidor de fijación por diodos NPC. La figura 58 muestra la captura del modelo utilizado en el entorno de simulaciones del programa PSCAD/EMTC,

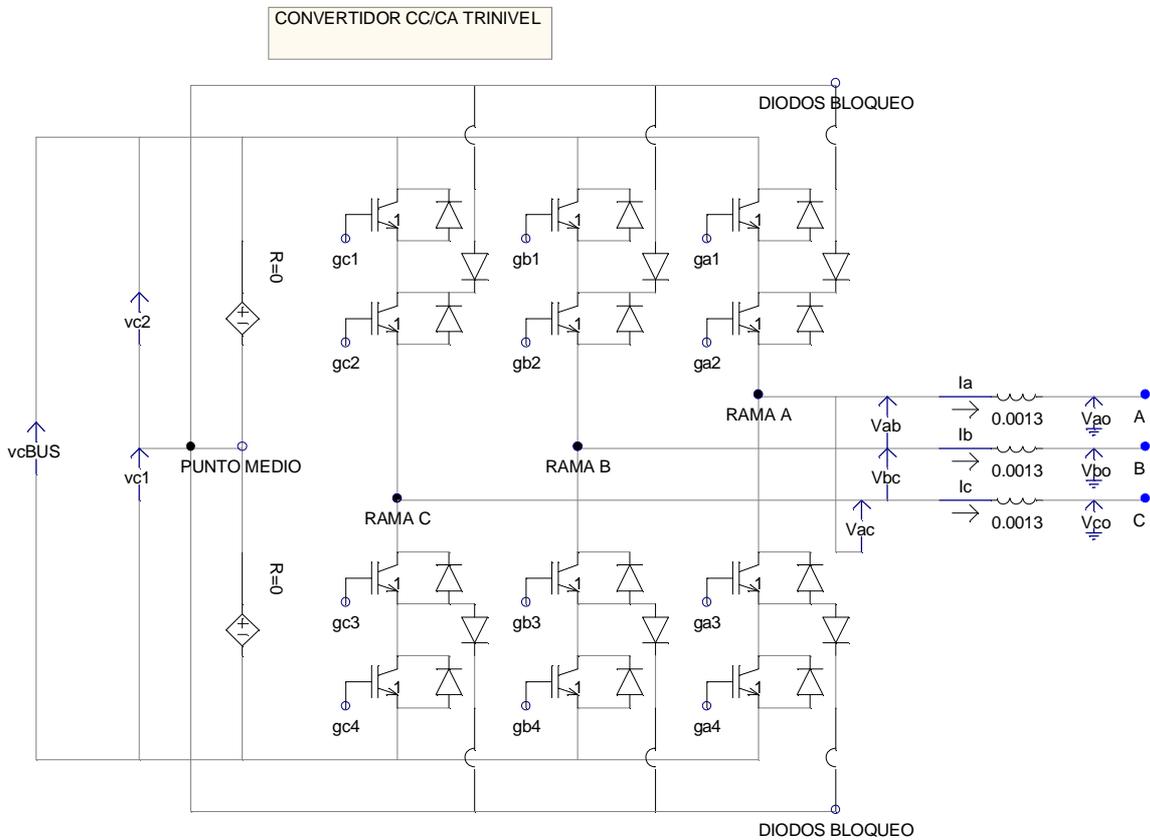


Ilustración 59. Modelado del inversor trinivel en PSCAD

Se puede observar que el modelo se corresponde con la topología anteriormente estudiada de convertidor trinivel NPC (Neutral-Point-Clamped), donde ahora tenemos cuatro interruptores o dispositivos de disparo por rama, el punto medio de equilibrado de los condensadores que se correspondería con la unión de la fuentes de tensión $uc2$ y $uc1$ y seis diodos de bloqueo.

Respecto al control del convertidor CC/CA trinivel, al contrario que en el caso del convertidor CC/CA de dos nivel el cuál ha sido analógico, se ha realizado un control digital mediante un algoritmo de modulación SVM (Space Vector Modulation). Este control se explicará con más detalle en el apartado 8 “algoritmos de modulación empleados” donde se representará y se realizarán comentarios al respecto. Sin embargo, a continuación se muestra en la figura 59 la captura del modelo de control del convertidor CC/CA trinivel,

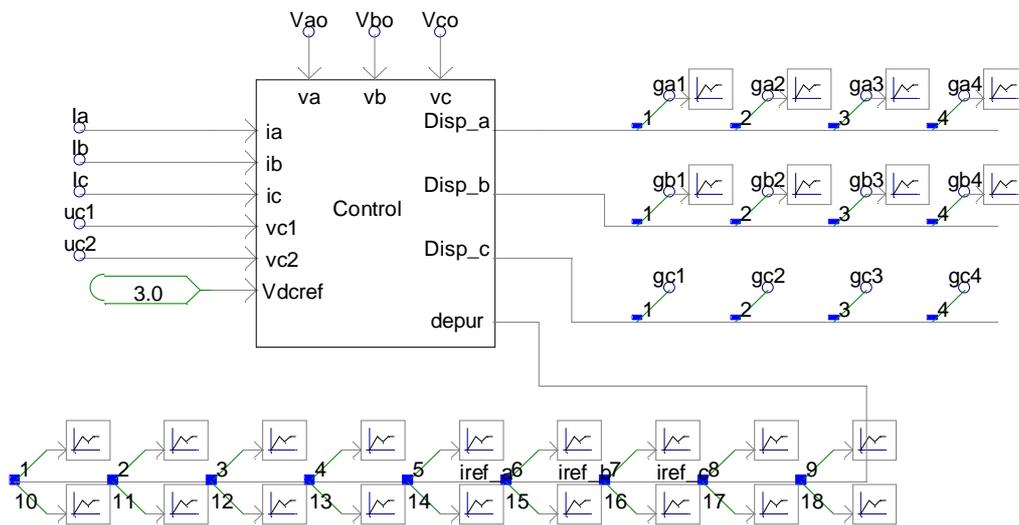


Ilustración 60. Captura del control del convertidor CC/CA trinivel

Se puede observar que el algoritmo de control necesita como señales de entrada las capturadas por el modelo a la salida del convertidor CC/CA, siendo las de tensión V_{ao} , V_{bo} y V_{co} y las corrientes i_a , i_b e i_c . Otras señales de entrada son los valores de las capacidades del BUS de continua y como consiga de control el valor de V_{dcref} deseado, del cuál se realizará el control.

Por el contrario, las señales de salida del bloque de control que son necesarias se corresponden con la de disparo de los cuatro semiconductores por cada rama $Disp_a$, $Disp_b$ y $Disp_c$ siendo todas las señales de disparo ga_1 , ga_2 , ga_3 , ga_4 , gb_1 , gb_2 , gb_3 , gb_4 , gc_1 , gc_2 , gc_3 y gc_4 respectivamente.

Otra salida que podemos observar es *depur* la cual tiene 20 dimensiones de señales como las corrientes de referencia por cada rama i_{ref_a} , i_{ref_b} , i_{ref_c} entre otras. Estas señales no sirven directamente para el control del inversor trinivel pero dan



información interna de las variables y ejecuciones del algoritmo utilizado, siendo parte fundamental para el correcto funcionamiento del control del inversor.

Finalmente se pueden observar el filtro inductivo representado por tres bobinas, una por cada fase, para el alisamiento y obtención de las corrientes de inyección deseadas. Los valores de dichas inductancias son $L_a = L_b = L_c = 1.3 \text{ mH}$.

6.4 Modelado del sistema completo

Por último y llegando a la meta del presente proyecto, mostramos el modelado del sistema completo de un sistema de energía eólica, desde la captación de energía mediante el movimiento mecánico de las palas del aerogenerador hasta la inyección de potencia en red mediante el convertidor CC/CA trinivel del sistema de acondicionamiento electrónico de potencia del aerogenerador. La figura 60 muestra el modelado final del sistema eólico completo.

Se puede observar en la figura 60 que ya se simulan en concordancia todos los modelados descritos anteriormente, con los controles independientes de funcionamiento del módulo mecánico-eólico y del convertidor DC/AC multinivel.

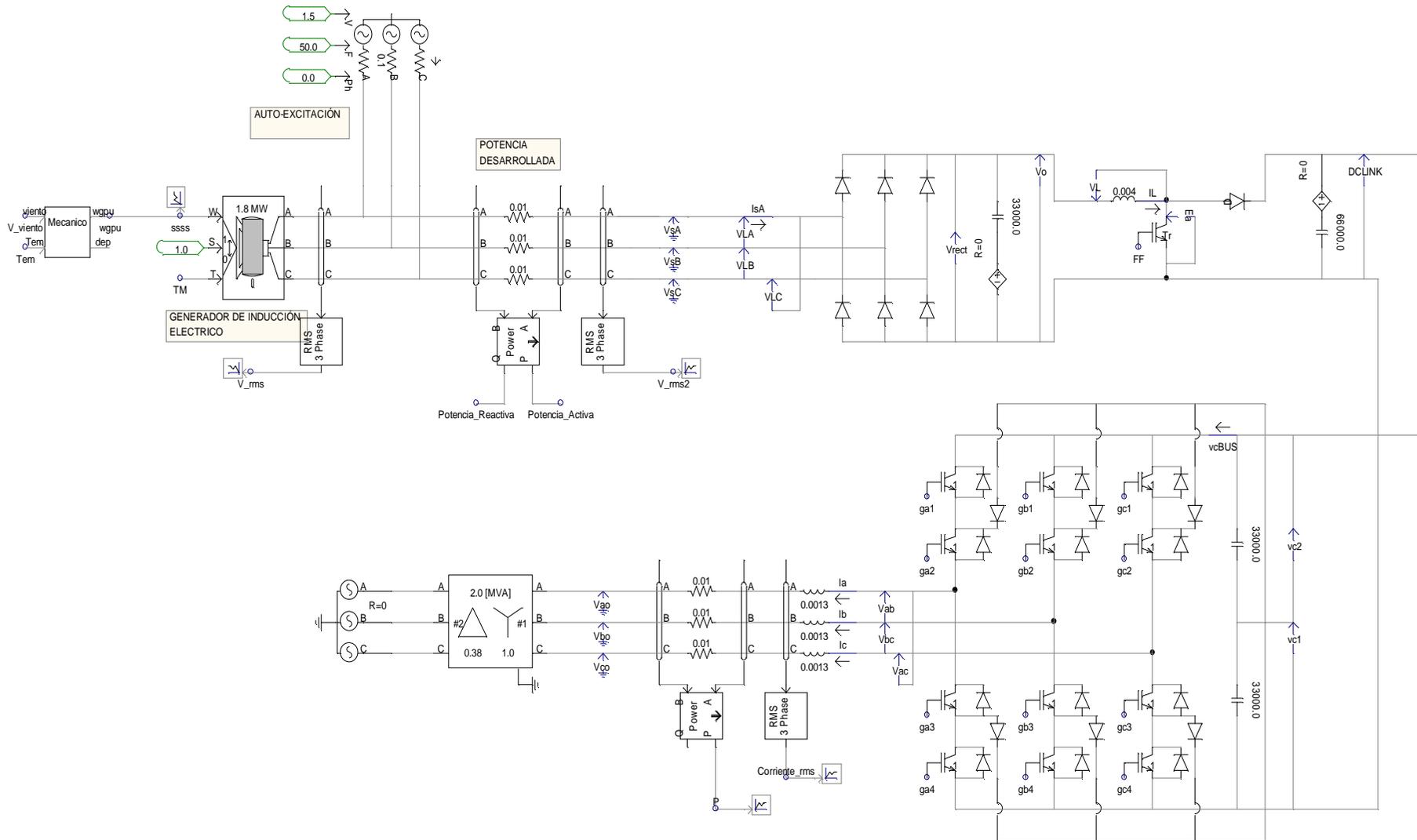


Ilustración 61. Modelado del sistema completo

7. SIMULACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado mostramos todos los resultados obtenidos de todas las simulaciones recreadas según los modelados mostrados a lo largo del proyecto, desde el aerogenerador con inversor de dos niveles (sin simulación de la potencia captada por el movimiento mecánico de las palas), hasta el aerogenerador con inversor trinivel y módulo mecánico eólico.

7.1 Simulaciones del aerogenerador de dos niveles

Sistema de acondicionamiento de potencia con elevador/chopper e inversor de dos niveles:

Las dos figuras de la ilustración 61 muestran un buen seguimiento de la corriente real de salida del inversor de la fase A respecto de la corriente de referencia calculada. La frecuencia de conmutación utilizada para la simulación con modulación PWM en el inversor de dos niveles es 850 Hz,

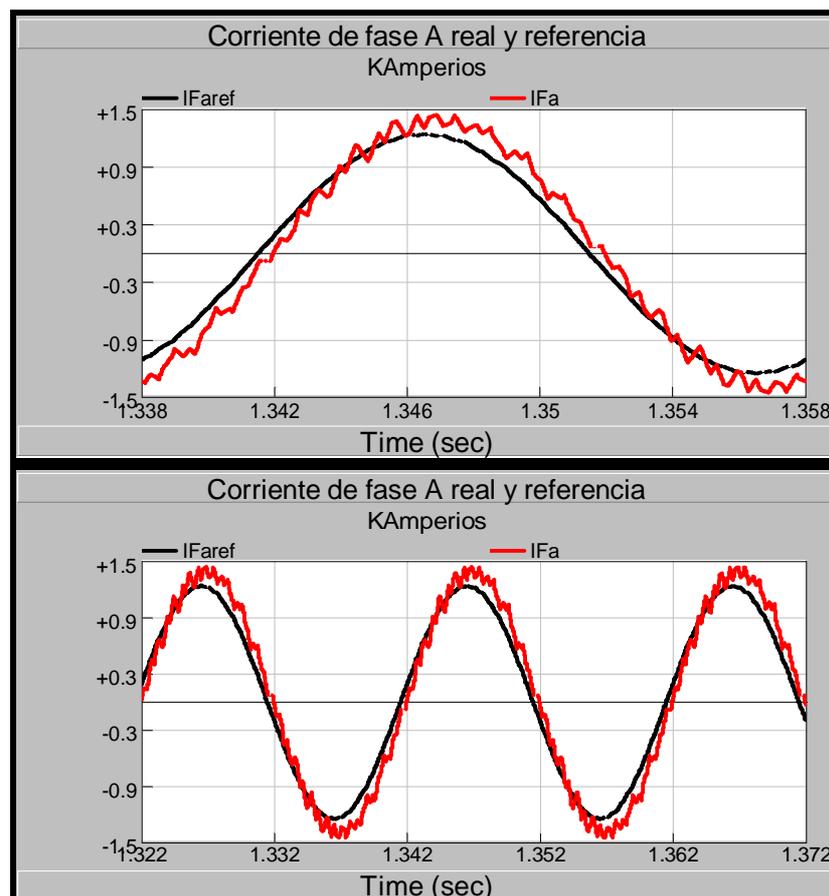


Ilustración 62. Corriente (fase A) de salida real y referencia

Ahora vemos las tres corrientes de salida del aerogenerador desfasadas antes de entrar en el transformador de 2MW con tensión de entrada de línea de 1 KV. Se muestran en la figura 62,

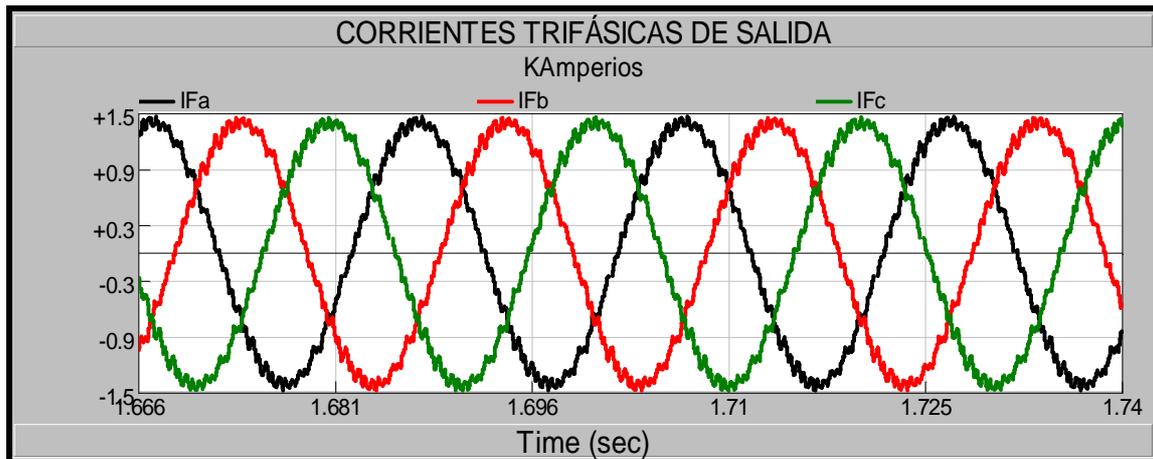


Ilustración 63. Corrientes de salida del inversor 2 niveles

Como se puede observar, las tres corrientes de cada rama del inversor A, B y C están desfasadas 120° con valores cercanos a los 1500 Amperios, realizando el análisis de la corriente RMS trifásica y considerando la tensión de línea de 1000 Voltios, tenemos un sistema acondicionador de potencia que inyecta aproximadamente (habría que hacer un análisis también de las pérdidas) unos 1,8 MW de potencia eléctrica nominal.

A continuación se muestran las figuras 63 y 64, que se corresponden con la tensión rectificada por el convertidor CA/CC no controlado por diodos, y la tensión de bus DC-LINK la cuál se corresponde con la salida controlada del elevador,

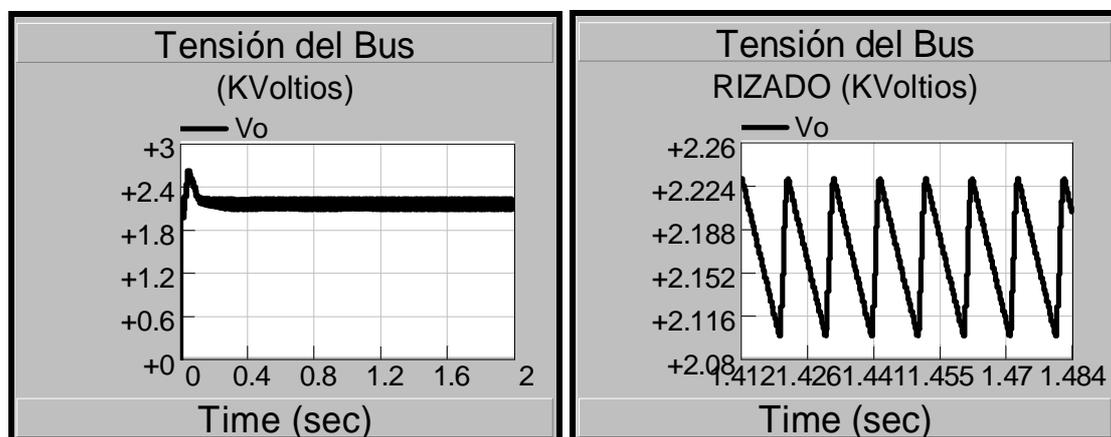


Ilustración 64. Tensión rectificada Vo y su rizado

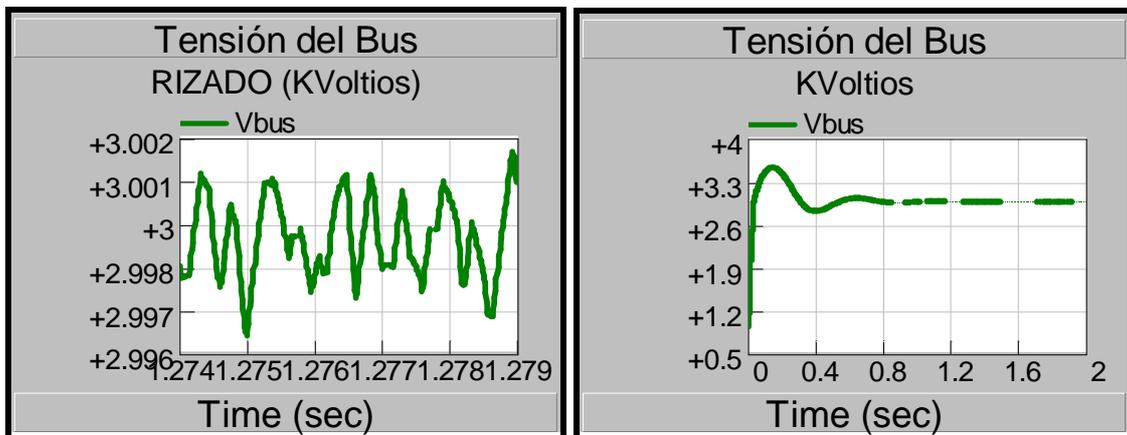


Ilustración 65. Tensión del DC-LINK (Vbus) y su rizado

Respecto a la tensión rectificada podemos observar en la simulación que se encuentra entorno a los 2.150 voltios con un rizado alrededor del 8%, mientras que la tensión del DC-LINK se encuentra entorno a los 3.000 voltios con un mínimo rizado del 0,2 %. Valores óptimos para el correcto funcionamiento de las simulaciones.

Como se comentó anteriormente, también se tendrá en cuenta y obtendrá los resultados de calidad de onda representado por los armónicos y THD de las corrientes y tensiones de salida del aerogenerador. Veamos las simulaciones obtenidas en PS-CAD de los 10 primeros armónicos impares y la distorsión armónica de la corriente por fase,

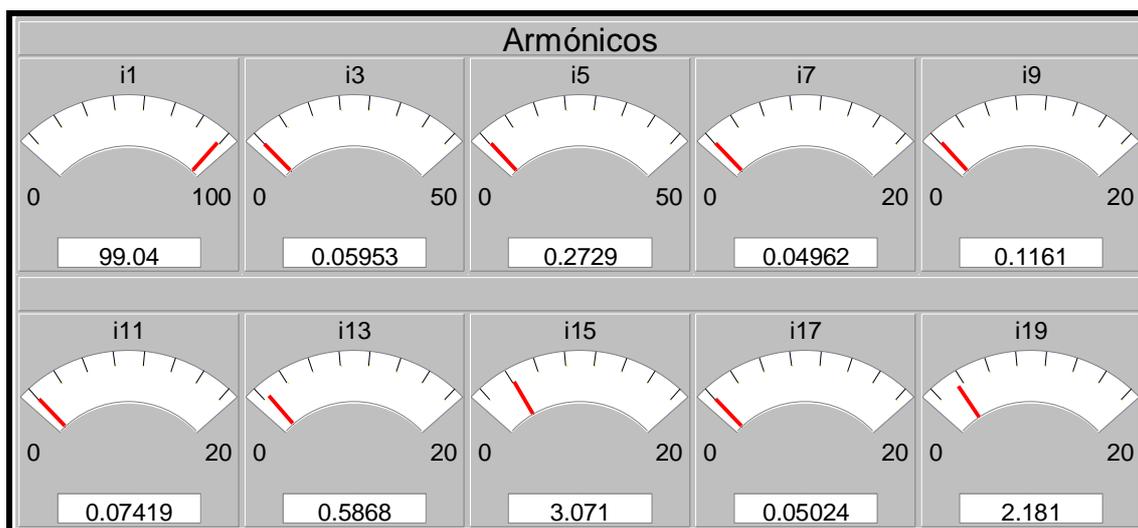


Ilustración 66. Armónicos para inversor de 2 niveles

La distorsión armónica por fase (THD en %) obtenida se muestra en la figura 66, con un THD medios de las tres corrientes de fases del 4,4 % por debajo del deseado que está entorno al (7-5)%,

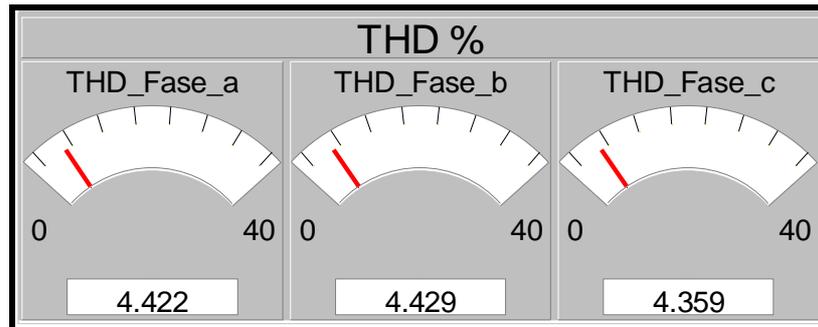


Ilustración 67. THD del inversor de dos niveles

Estas simulaciones han sido obtenidas y representadas porque luego servirán como herramienta de comparación con las simulaciones que se obtengan para el modelado del sistema completo con el inversor trinivel, realizando por tanto un posterior análisis de los resultados obtenidos de la comparación.

7.2 Simulaciones del generador eléctrico de inducción

En este apartado representamos las simulaciones obtenidas para la aeroturbina,

Dichas simulaciones del sistema módulo mecánico-eólico + generador de inducción se han realizado bajo la única consigna de la variación de velocidad (en m/s) del viento. Esta variación del viento se introduce en el módulo mecánico-eólico como una señal externa, la cuál se ha modificado manualmente generando diferentes perfiles de viento de 8 m/s, 12 m/s, 16 m/s, 18 m/s, 22 m/s y 25 m/s como se puede apreciar en la figura 69 de perfiles de viento,

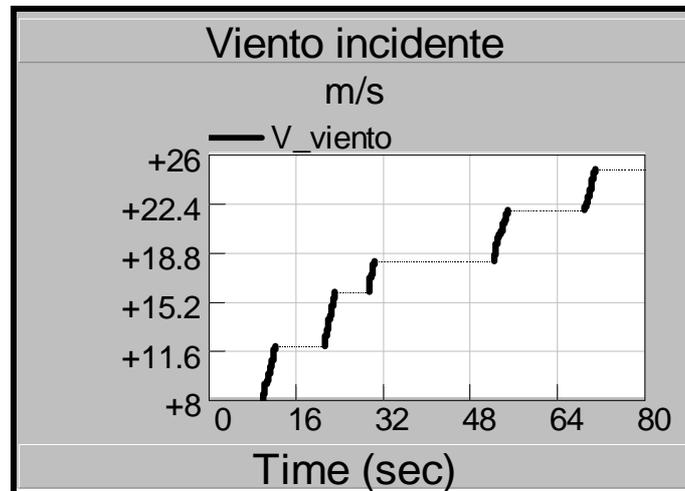


Ilustración 68. Perfiles de viento simulados

El módulo mecánico-eólico genera a su salida la velocidad angular de consigna (p.u.) de entrada del generador eléctrico de inducción según la velocidad del viento:

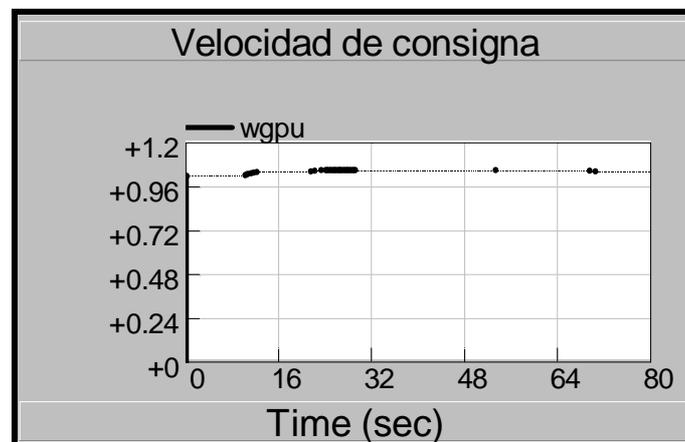


Ilustración 69. Velocidad de consigna generada por el módulo mecánico-eólico

La velocidad de consigna representada se ha realizado para una simulación de 80 seg. con la variación de viento desde 0 m/s hasta 25 m/s. Hay que tener en cuenta que dicha velocidad de consigna sale en p.u. hacia el generador de inducción.

Del mismo modo, con las mismas variaciones de viento, se muestra a continuación el par mecánico TM obtenido del generador de inducción:

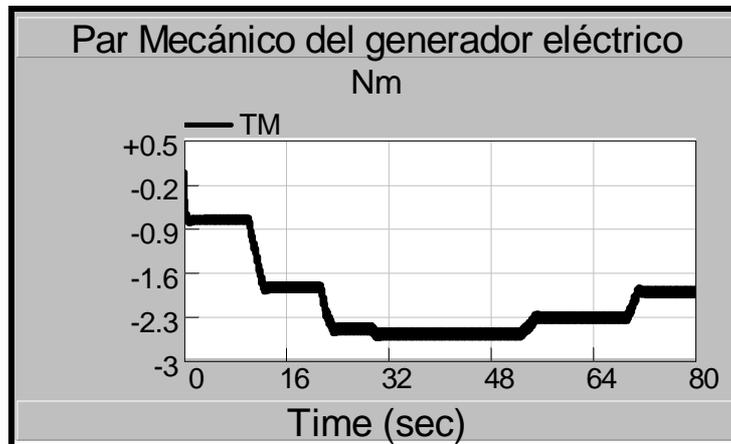


Ilustración 70. Par mecánico del generador de inducción

Finalmente se muestra la Potencia desarrollada por el generador eléctrico de inducción en función de los perfiles de velocidad de viento generados:

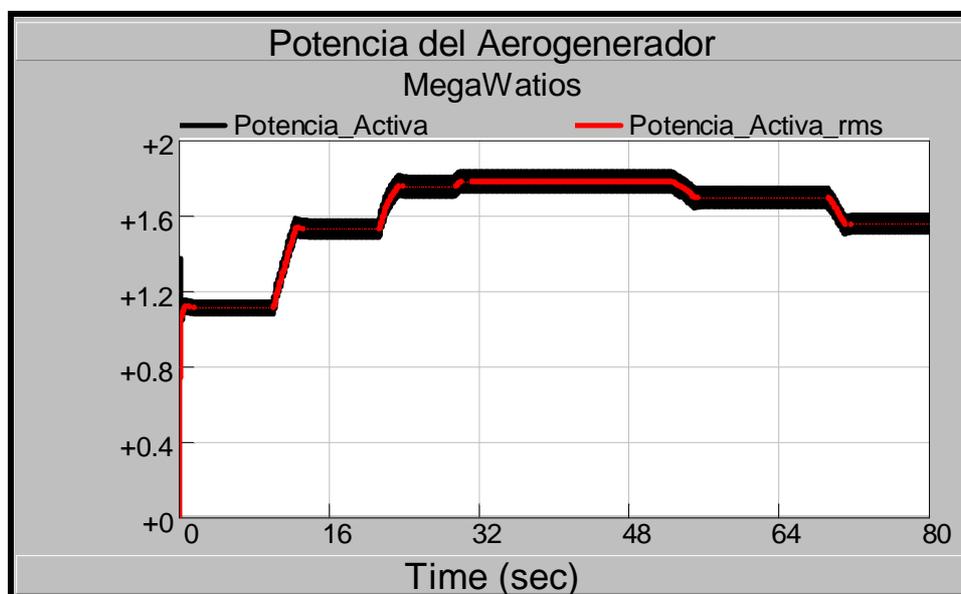


Ilustración 71. Generación de potencia según perfiles de viento

Se observa que inicialmente se produce unos transitorios de generación de potencia no reales ya que no se ha tenido en cuenta el arranque mecánico real de las palas del aerogenerador, produciéndose el movimiento instantáneo de las palas en cuanto se introduce un perfil de viento. Una vez comentado estos transitorios iniciales, se puede observar como la potencia del aerogenerador varía según el perfil de velocidad de viento introducido, consiguiendo la potencia nominal del aerogenerador de 1,8 MW entorno a los 15 m/s. A perfiles de velocidad de viento mayores el aerogenerador sufre unas pequeñas pérdidas de potencia respecto a la nominal, siendo la generación de

potencia del aerogenerador hasta valores máximos de 25 m/s por motivos de seguridad y mecánicos del generador eléctrico.

7.3 Simulaciones del inversor trinivel NPC

Las simulaciones del modelado del inversor trinivel se han realizado con una tensión de referencia del DC-LINK fija de 3.000 voltios y por tanto un equilibrado de tensiones en uc1 y uc2 de 1.500 voltios.

Del mismo modo que en el apartado de simulaciones del inversor de dos niveles, las figuras que vienen a continuación muestran el seguimiento de la corriente real de salida del inversor de la fase A respecto de la corriente de referencia calculada. Hay que hacer saber, que para el caso de las simulaciones del inversor trinivel se han considerado dos posibles estrategias de resultados de las corrientes trifásicas de salida, las cuales representan las múltiples ventajas que ofrecen los inversores CC/CA multinivel y que según el resultado deseado se puede optar por una u otra.

El primero de los dos resultados muestra y representa las salidas de las corrientes trifásicas del inversor con una tensión de línea de salida de 1KV como en el caso del inversor de dos niveles, y por lo tanto como se muestra en la figura 71, obteniendo un mejor seguimiento y una calidad de onda de corriente muy conseguida,

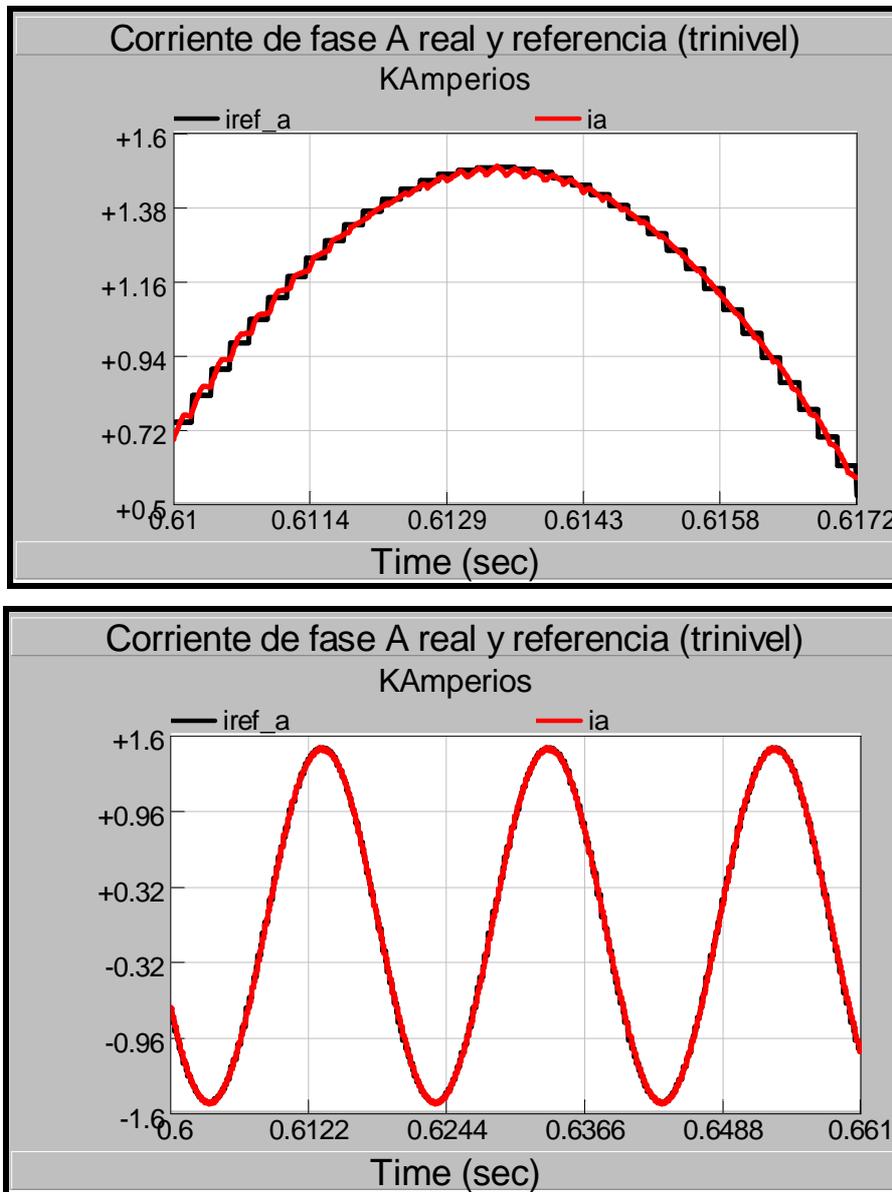


Ilustración 72. Corriente de fase A y referencia del inversor trinivel

Las tres corrientes de fase A, B y C de salida del inversor trifásico se muestran en la siguiente figura,

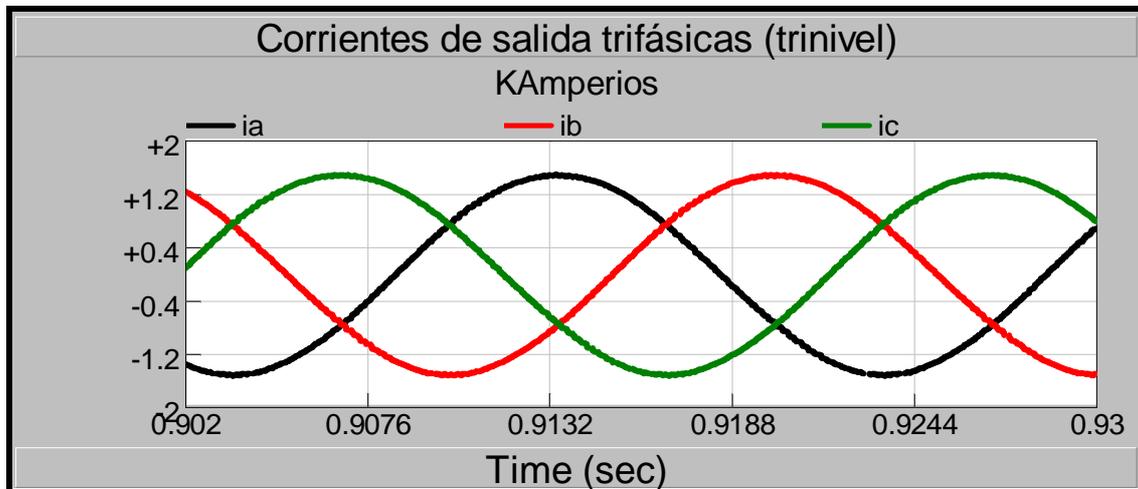


Ilustración 73. Corrientes trifásicas del inversor trinivel

El segundo de los resultados obtenidos muestra y representa las salidas de las corrientes trifásicas del inversor, pero ahora con una tensión de línea de salida de 1,8 KV. Esto es posible por los tres niveles de tensión del inversor trifásico, soportando de esta manera menor caída de tensión los semiconductores de tal inversor y consiguiendo como resultado corrientes de salidas más bajas, con la ventaja de poder utilizar bobinas de alisamiento de salida de menor tamaño. Se muestra a continuación la corriente de salida de la fase A y la de referencia,

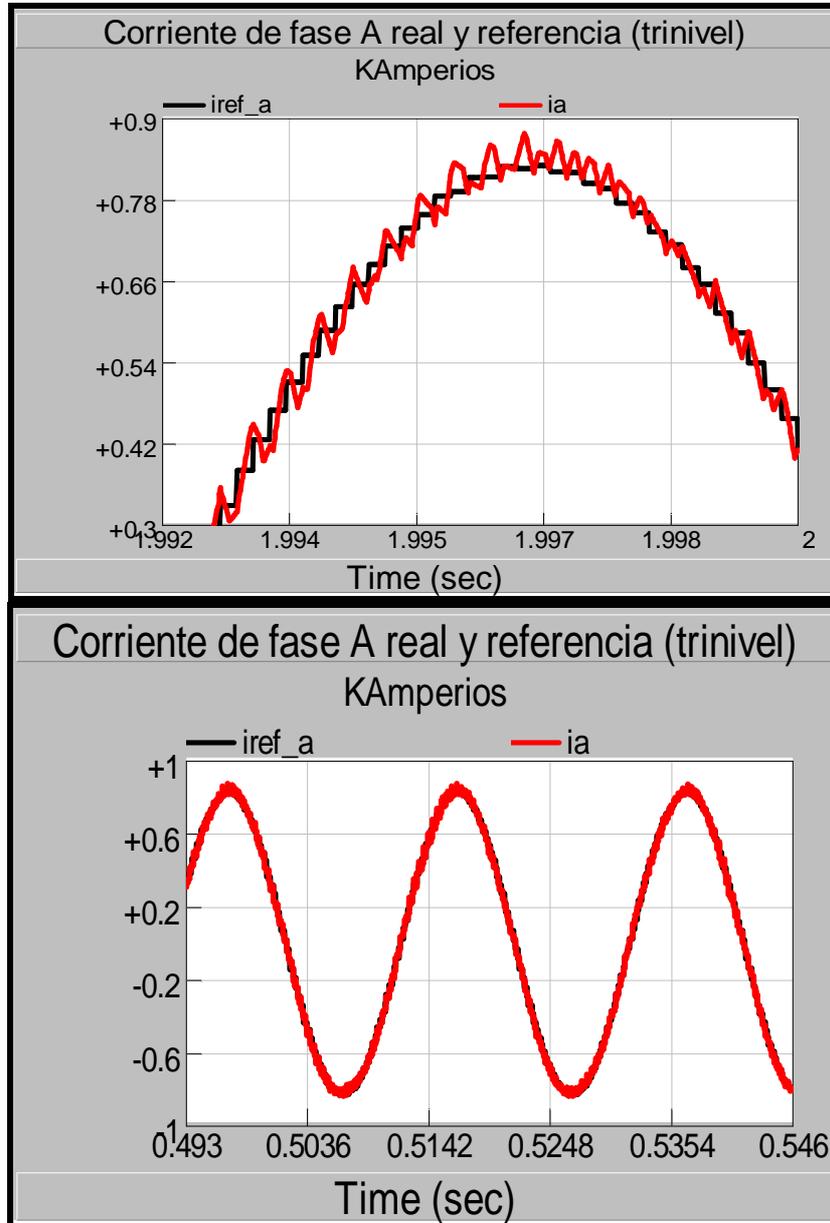


Ilustración 74. Corriente de fase A II y referencia del inversor trinivel

Ahora vemos las tres corrientes de salida trifásicas del aerogenerador desfasadas antes de entrar en el transformador de 2 MW con tensión de entrada de línea de 1,8 KV. Se muestran en la figura 74,

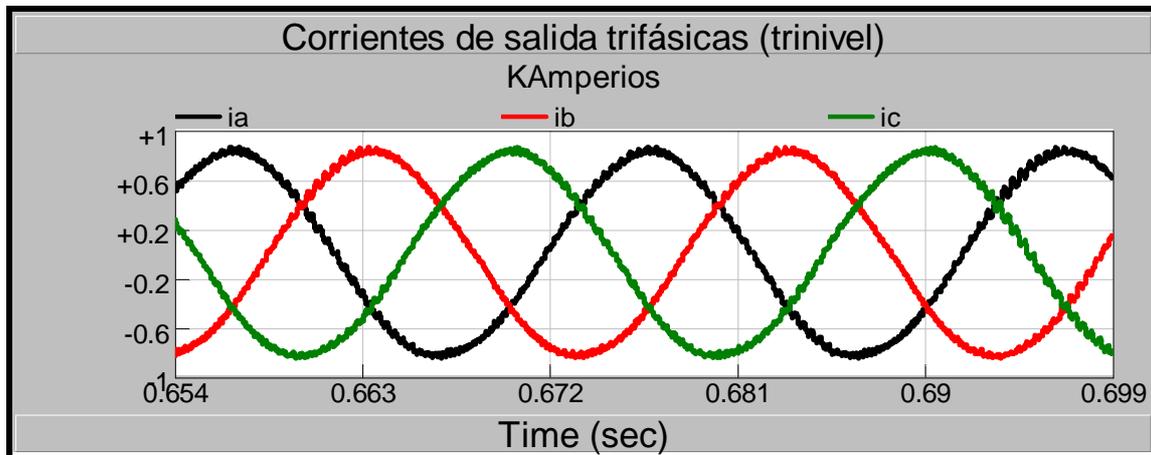


Ilustración 75. Corrientes trifásicas II del inversor trinivel

Comprobamos que las corrientes de salida del inversor trinivel disminuyen, al tener una tensión de salida mayor, con las respectivas ventajas de usar bobinas de alisamiento a la salida de menor tamaño y coste; aunque, como podemos observar, se pierde en calidad de onda de corriente a inyectar.

7.4 Simulaciones del sistema completo

Este apartado muestra la finalidad del presente proyecto, el cual pretende mostrar la utilización de tecnología multinivel en sistemas eólicos de generación de energía eléctrica. Se ha intentado, para una mejor comparación de cara al inversor, no variar demasiado la topología inicial de dos niveles respecto a la utilización de una topología multinivel, por ello se ha optado por seguir manteniendo una rectificación inicial no controlada de diodos y un elevador de control de corriente hacia el inversor trinivel. Del mismo modo se ha optado por mantener la misma tensión de línea a la salida con los mismos valores de bobina del filtro de salida del inversor CC/CA trinivel.

Inicialmente se muestra la rampa de perfil de viento utilizada respecto a la potencia activa nominal generada, que al contrario que en las simulaciones del generador eléctrico de inducción, se ha optado por una rampa con una única pendiente y no perfiles de viento escalonados. Se muestra en la figura 75,

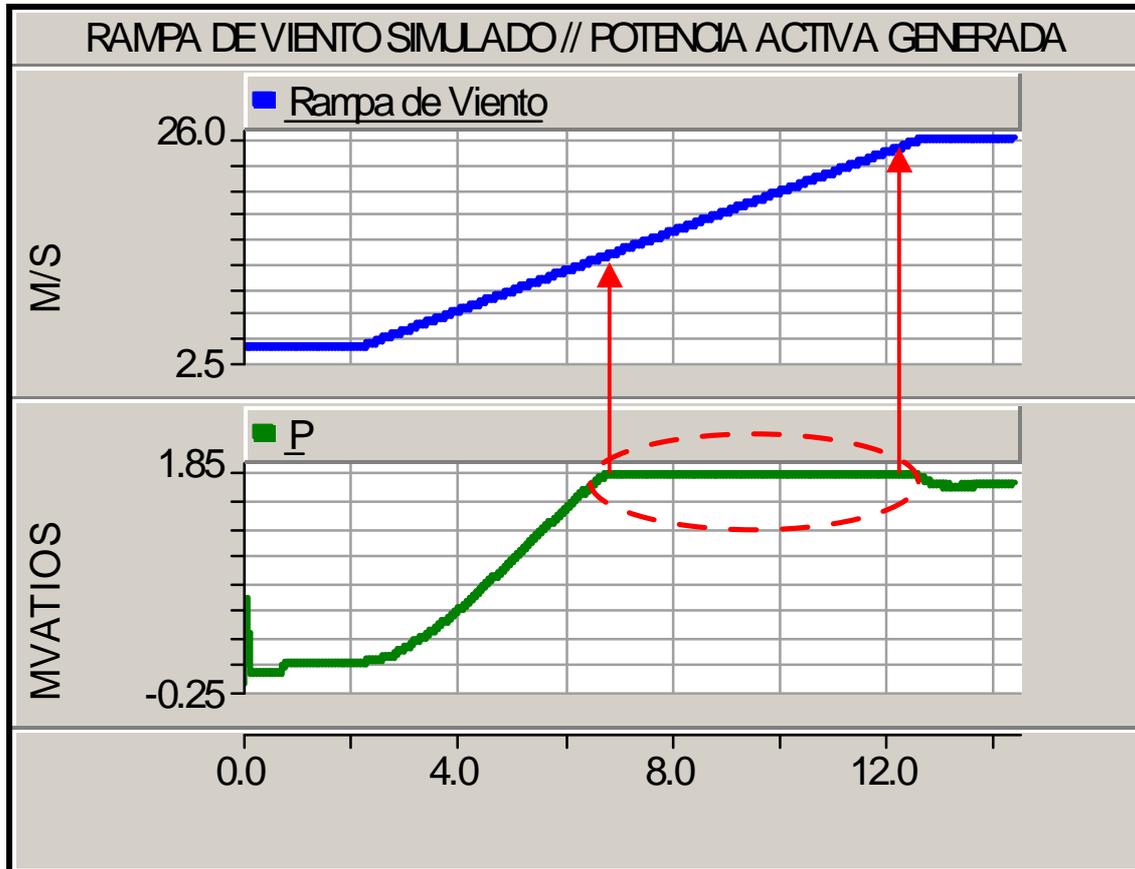


Ilustración 76. Perfil de viento-Potencia activa generada

Podemos observar que sobre el perfil de viento de 4 m/s se empieza a generar potencia hasta alcanzar la potencia nominal para un perfil de unos 13 m/s, permaneciendo constante la generación de potencia activa durante un amplio rango de perfil de viento (como se ha resaltado dentro de una elipse) hasta alcanzar ya velocidades altas (del orden de 22-25 m/s) donde la potencia activa decae en su generación.

A continuación y siguiendo el sentido del flujo de energía se muestra la tensión rectificadora, con un valor del orden de los 2200 voltios,

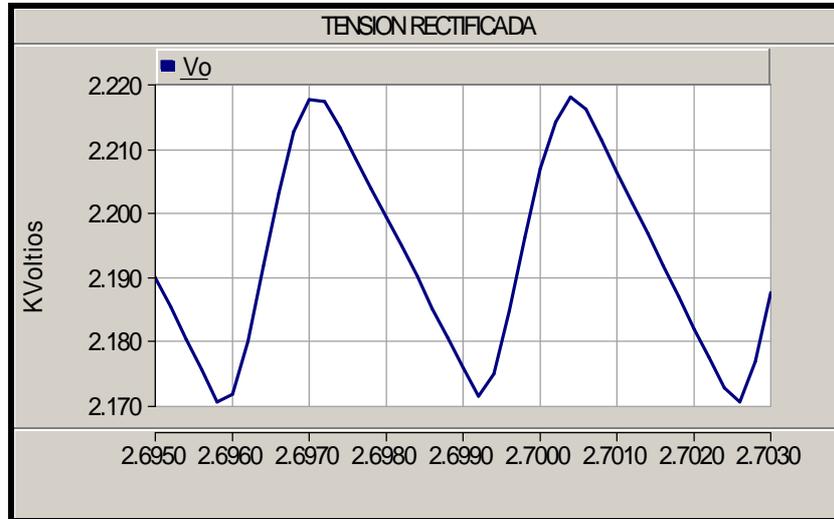


Ilustración 77. Tensión rectificada no controlada

Lo siguiente que nos encontramos es el elevador o chooper, el cuál realiza el control del flujo de corriente, según el perfil de viento en ese instante, hacia el inversor CC/CA trinivel. Se muestra en la figura 77 el seguimiento de la corriente por el elevador según su referencia para los valores de la rampa de perfil de viento anterior,

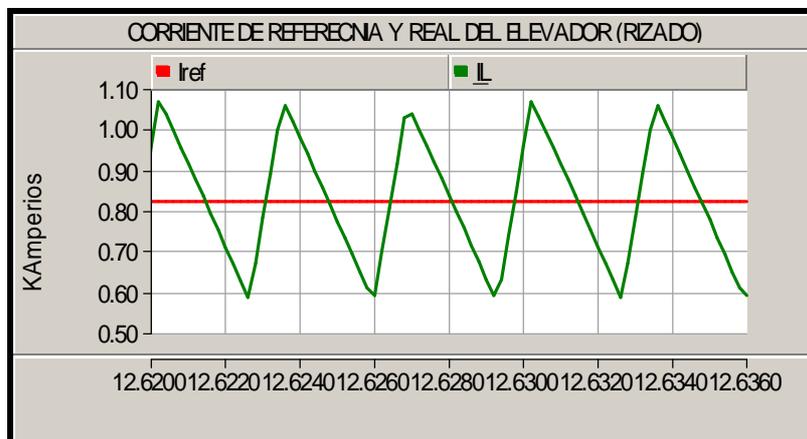
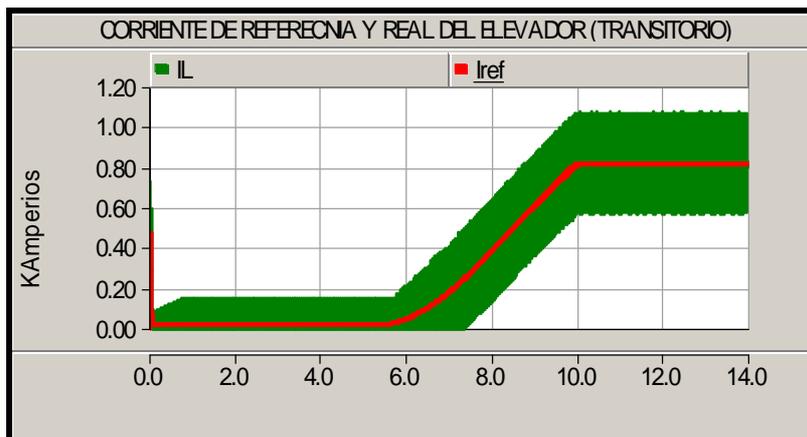


Ilustración 78. Seguimiento de corriente por el elevador

El control del inversor trinivel se ha realizado mediante la modulación SVM, mientras que el control de la corriente a través del elevador se ha realizado mediante la modulación PWM. Esto es debido a que la modulación del elevador (ya que requiere una frecuencia de conmutación distinta y menor) puede ir independientemente de la estrategia de control del inversor CC/CCA, de este modo el elevador puede ser controlado tanto con modulación PWM o Bang-Bang, siendo la más utilizada para el control de corriente la estrategia Bang-Bang. Para el control del elevador, se realiza el cálculo de una Potencia de Referencia mediante el Par Mecánico T_M (el cual depende de la velocidad del viento en ese instante) y la velocidad de sincronismo en ese instante del módulo mecánico. Una vez calculada la potencia de referencia y con el valor de la tensión rectificadora, obtenemos la corriente de referencia a seguir por mi sistema; esta corriente de referencia la comparamos con la corriente real que circula por el elevador y al error resultante se le realiza un control PI para la obtención de la señal de control a comparar con la señal triangular de 300 Hz de frecuencia de conmutación.

En el control SVM introducimos, como una variable de control externa, la tensión del BUS o DC-LINK para el equilibrado del punto medio de las tensiones. Se muestra a continuación, en la figura 78, la tensión del BUS justo al valor de su referencia y los valores de las tensiones de entrada del inversor trinivel con el equilibrado del punto medio. Siendo la tensión del Bus de 3000 Voltios y las tensiones V_{c1} y V_{c2} de 1500 voltios.

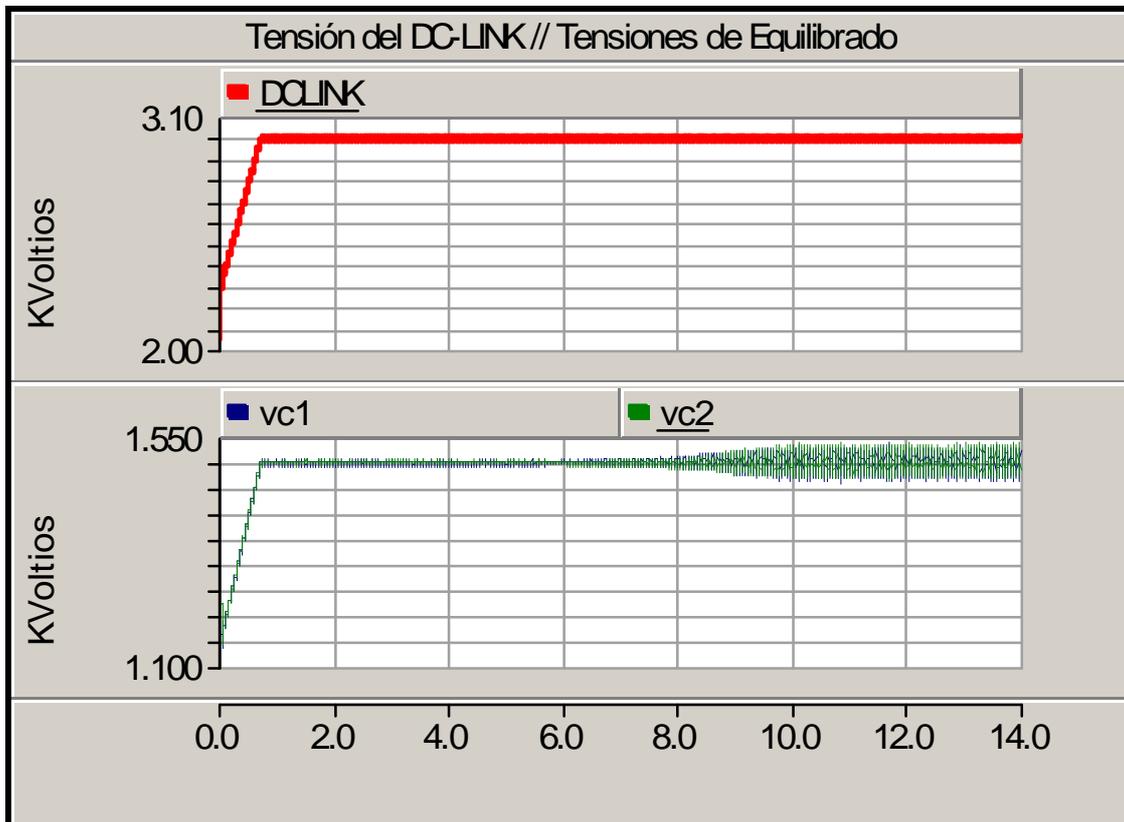


Ilustración 79. Tensión del DC-LINK y tensiones de equilibrado del punto medio

Por último representamos las corrientes de salida del inversor CC/CA trinivel. La corriente escogida es la corriente de la fase B siendo idéntica a las corrientes de las otras dos fases. Se representa la corriente de referencia obtenida en el control digital seguida por la corriente real de salida del sistema, también podemos apreciar un seguimiento de la corriente real respecto a la corriente de referencia muy conseguido debido a la modulación SVM, además de obtener un rizado mínimo de la corriente real.

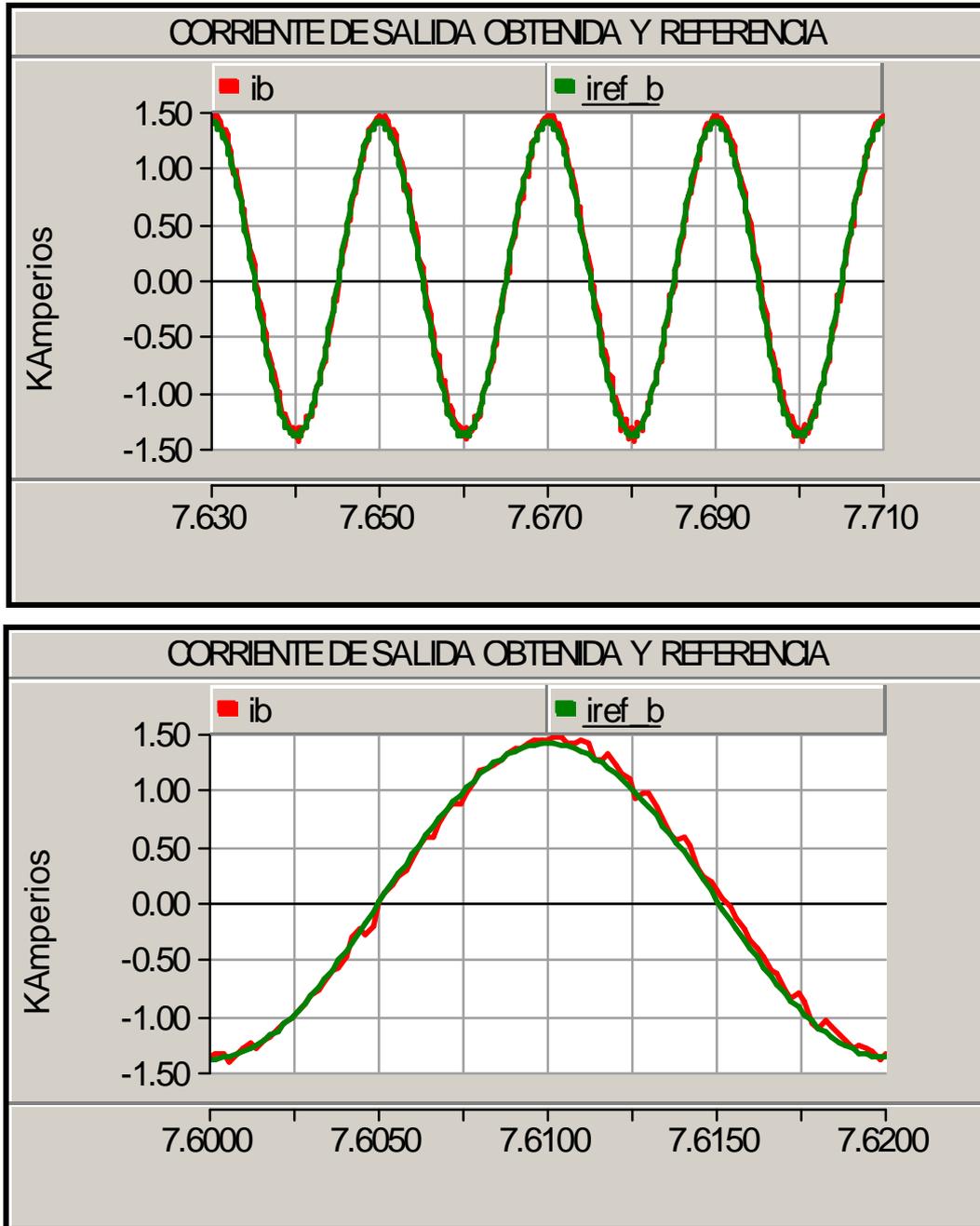


Ilustración 80. Corriente de salida y referencia

Por tanto, se muestra en las simulaciones una mejor corriente de salida del sistema a inyectar en red debido a los avances en la tecnología de inversores multinivel, tanto en rendimiento y avances tecnológicos al nivel de semiconductores y topologías como en algoritmos de control y dispositivos de cálculos avanzados (DSPs). Mostramos ya en la siguiente gráfica las tres corrientes de fase de salida del inversor CC/CA trinivel,

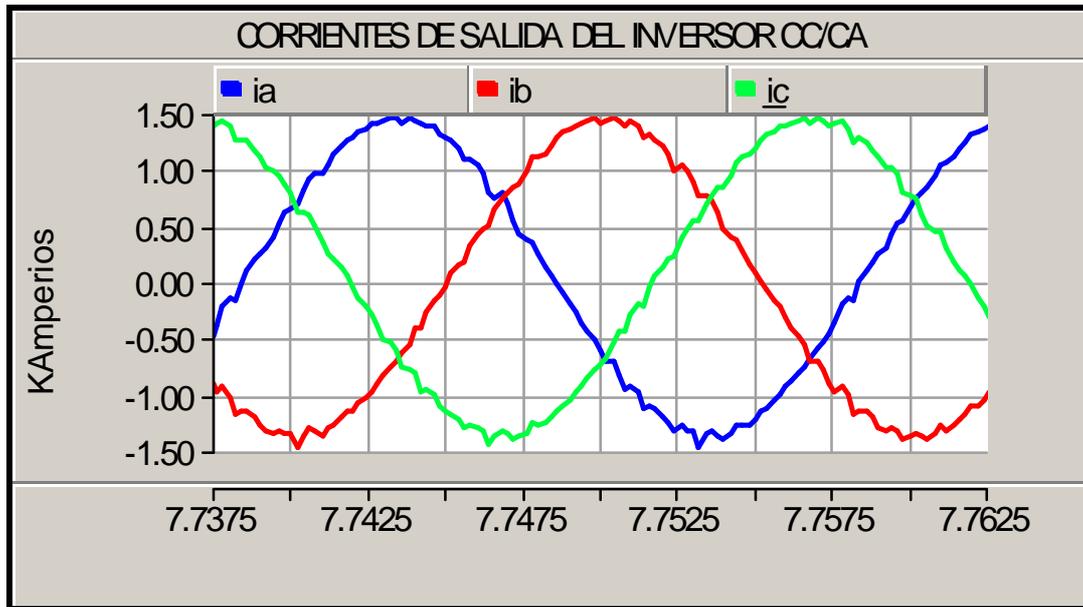


Ilustración 81. Corrientes de salida del inversor CC/CA trinivel

De modo de comparación de calidad de onda a inyectar a red se muestran los armónicos obtenidos para las corrientes de fase de salida del inversor trinivel,

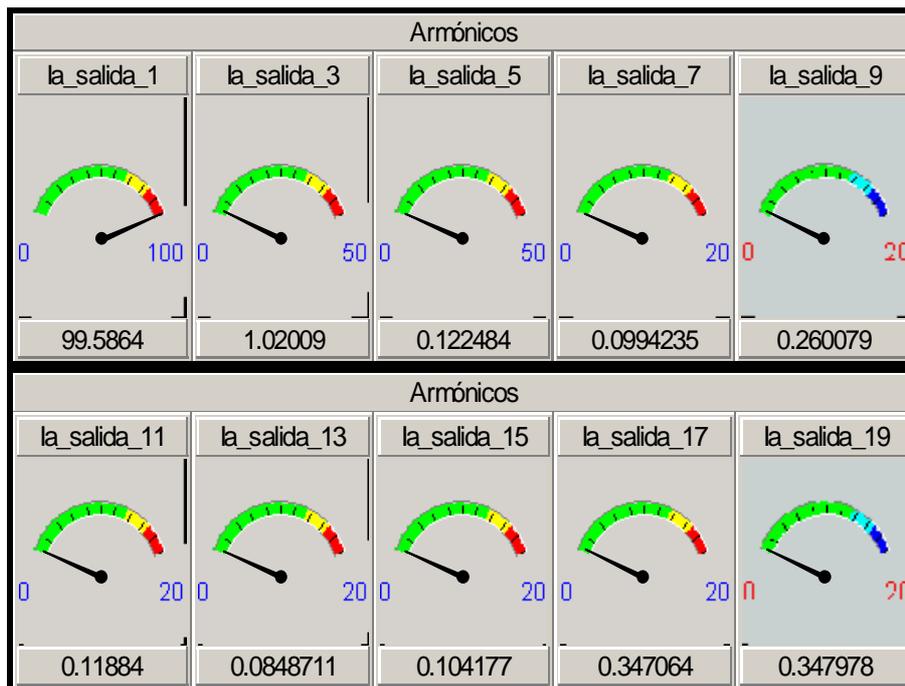


Ilustración 82. Armónicos de corriente de salida del sistema

Del mismo modo la distorsión total armónica (THD %) por fase es,

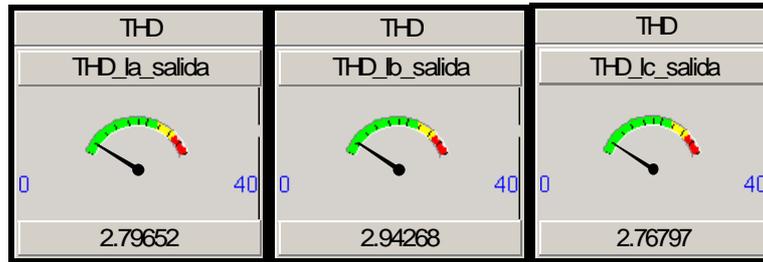


Ilustración 83. THD de corriente de salida

Obtenemos un THD inferior al caso del inversor de dos niveles, además hay que tener en cuenta y resulta importante a la hora de obtener una potencia de inyección con la mayor calidad posible, que se consigue un seguimiento mucho más ajustado por lo que se obtiene un factor de potencia mucho más próximo a la unidad.

7.5 Comparación con Inversor PWM de dos niveles e Inversor Multinivel

La Figura 83 se muestra, aunque no a la misma escala, una comparación cualitativa entre el voltaje generado por un inversor PWM, y el generado por el inversor trinivel desarrollado en esta memoria. Se puede observar claramente que la tensión generada por el inversor trinivel contiene tres valores de tensión por los dos niveles del inversor PWM, prácticamente la mitad de la tensión soportarían los semiconductores del inversor trinivel o para la misma tensión a soportar se generaría prácticamente el doble de potencia.

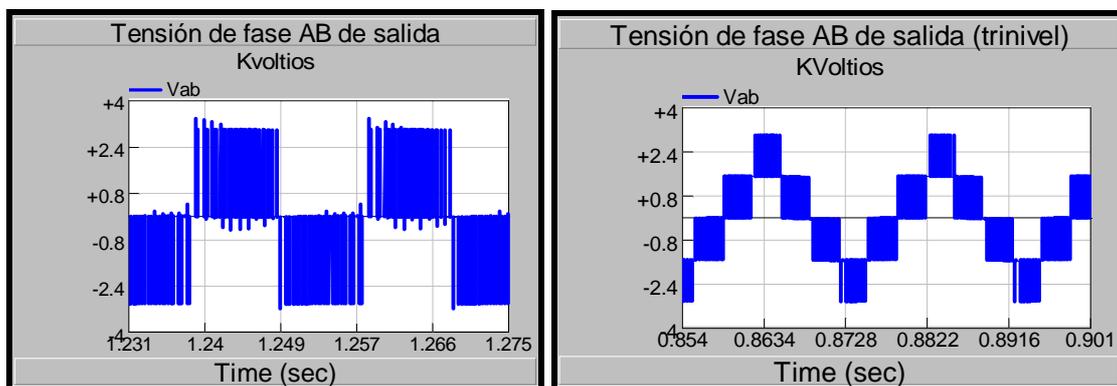


Ilustración 84. Comparativa de tensiones de fase a la salida de inversores CC/CA

Por su parte, en la figura 84 se muestra esta misma comparación, pero para la corriente en los dos tipos de inversores, donde nuevamente se ven las buenas propiedades de la corriente generada con el inversor trinivel.

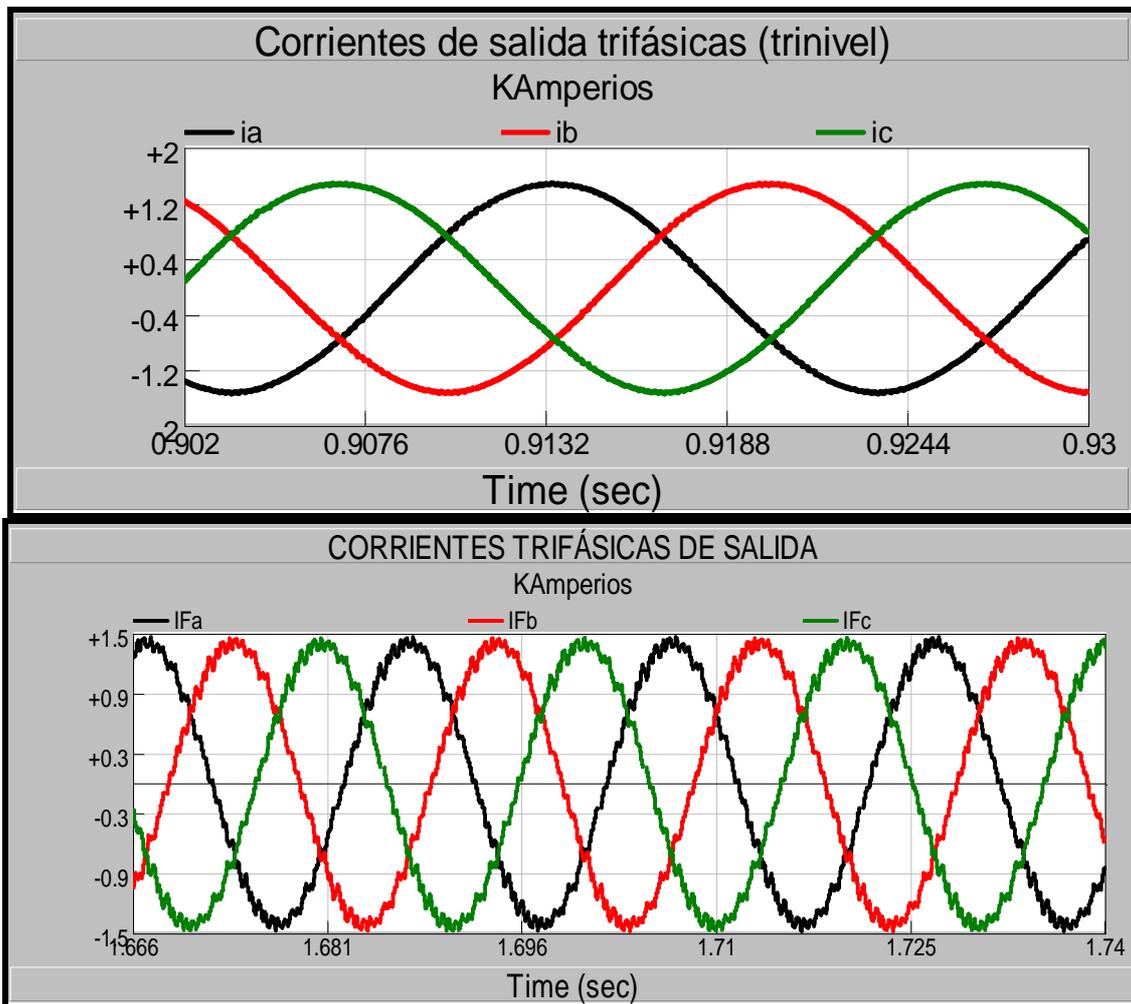


Ilustración 85. Comparativa de corrientes trifásicas de ambas tecnologías

Con estas comparaciones queda claro el gran aporte de la tecnología multinivel al perfeccionamiento de los convertidores estáticos.

Por último queda mencionar que el factor de potencia obtenido con la tecnología multinivel junto con la modulación SVM se acerca más a la unidad que en el caso del inversor de dos niveles con modulación PWM.

8. ALGORITMOS DE MODULACIÓN EMPLEADOS

En este apartado se muestra los algoritmos de modulación empleados en el control del módulo mecánico eólico y en el control del inversor trinivel NPC,

8.1 Algoritmo del módulo mecánico eólico

```
/****** Archivos de cabecera *****/
#include "math.h"
#include "stdio.h"

/****** Para nombrar como PSCAD (Fortran convention) *****/
typedef double real;
typedef long int integer;
typedef bool logical;

/*Parametros necesarios*/
#define r      35                /*Radio de pala para
aerogenerador 1,8 MW*/
#define gr     87.7             /*Relacion de
multiplicacion 1,8 MW*/
#define d_aire 1.125           /*Densidad del aire*/
#define Dt     0.0             /*Amortiguamiento de la
turbina*/
#define Dg     0.8             /*Amortiguamiento en
generador(parto de que se pierde por rozamiento un 2% de la
Pnominañ)*/
#define Jt     140.225         /*(1078516)/gr^2 PARA
EL 800!!! Inercia de turbina(parto del valor de baja JR
dado por MADE)*/
#define Jg     33.6            /*(28+5.6) Inercia de
generador(AE 46) + caja de transmision (800!!!) (parto de
los valores de alta JHS y Jbr dados por MADE)*/
#define Ka     6344.839        /*(4.88e+007)/gr^2
PARA EL 800!!! Rigidez del eje de alta (parto del valor de
baja KLS dado por MADE)*/
#define ca     3000            /*PARA EL 800!!!
Amortiguamiento del eje (parto del valor de alta CHS dado
por MADE)*/
#define V_ref  1500           /*Velocidad de
referencia del generador (1500 rpm)*/
#define n_pares_polos  2
#define PERIODO 1./5000.

float Calculo_CP(float ,float );
float spline(float* ,float* ,float* ,float );
float Calculo_Beta(float,float);
```

```
extern "C" void mecanico(real* viento,real* Tem,real*
WGPU,real* aux,real DELT,logical TIMEZERO,real TIME)
{
static real lambda; /*Relacion de velocidades*/
static real beta; /*Paso de la pala (grados)*/
static real CP; /*Performance coefficient*/
static real omega_t; /*Velocidad de giro de la turbina
(en rad/s) vista desde el generador*/
static real omega_t_ant;
static real omega_g; /*Velocidad de giro del generador
(en rad/s)*/
static real omega_g_pu;
static real omega_g_ant;
static real integral_par; /*Valor de la integral para el
calculo del par en el eje*/
static real T_t; /*Par ejercido por la turbina (Nm)*/
static real T_eje; /*Par en el eje (Nm)*/
static real T_em; /*Par electromagnetico*/
static real v_viento; /*velocidad del viento*/
static int cuenta;
static real noCiclos;
/*Parametros necesarios*/
if (TIMEZERO)
{
noCiclos = floor(PERIODO/DELT);
cuenta = 0;
lambda = 0; /*Relacion de velocidades*/
beta = 0; /*Paso de la pala (grados)*/
CP = 0; /*Performance coefficient*/
omega_t = 158; /*Velocidad de giro de la turbina
(en rad/s) vista desde el generador*/
omega_t_ant = 158;
omega_g = 158; /*Velocidad de giro del generador
(en rad/s)*/
omega_g_pu = 0;
omega_g_ant = 158;
integral_par = 0; /*Valor de la integral para el
calculo del par en el eje*/
T_t = 0; /*Par ejercido por la turbina (Nm)*/
T_eje = 0; /*Par en el eje (Nm)*/
T_em = 0;
}
cuenta++;
/*el paso de integración es una variable que me suministra
PSCAD*/
if((cuenta>=noCiclos))
{
cuenta=0;
v_viento=(*viento);
}
```

```

T_em=-4200*( *Tem);
/*Calculo de los parametros de funcionamiento*/
lambda = (omega_t_ant * r / gr)/v_viento;
//beta = Calculo_Beta(omega_t_ant,PASOINT); /*ver
abajo*/
beta = 0.0; /*emular la curva CP/lambda del AE46
con los datos q tengo del 800*/
CP = Calculo_CP(beta,lambda); /*ver abajo*/
/*Calculo de par en eje y turbina*/
T_t = 0.5 * d_aire * 3.141592 * r * r * v_viento *
v_viento * v_viento * CP / omega_t_ant;
integral_par += (omega_t_ant -
omega_g_ant)*PERIODO;
T_eje = Ka * integral_par + ca * (omega_t_ant -
omega_g_ant);

/*Calculo de velocidades angulares de la turbina y
el generador*/
omega_t = omega_t_ant + (PERIODO/Jt)*(T_t - T_eje -
Dt * omega_t_ant);
omega_g = omega_g_ant + (PERIODO/Jg)*(T_eje - T_em
- Dg * omega_g_ant);

omega_t_ant = omega_t;
omega_g_ant = omega_g;

omega_g_pu = omega_g * n_pares_polos / 314.1592;
(*aux) = 30*omega_t/3.1416;
//(*aux) = lambda;
(*WGPU) = omega_g_pu;
}
}

float Calculo_CP(float beta,float lambda)
{
/*Esta funcion calcula CP en funcion de beta y lambda.
Para eso calcula cpmaxb, lob y lmaxb en funcion de beta
(interpolando)
a partir de ahi calcula a,b y c, y calcula el cp de una
u otra forma dependiendo del valor que tome lambda*/

float betas[16] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20,25,30,35};
float cpmax[16] =
{0.485,0.486,0.477,0.455,0.420,0.380,0.341,0.303,0.271,0.24
2,0.217,0.127,0.088,0.062,0.048,0.038};
float lo[16] =
{19.5,25,33.7,42.1,41.4,34.9,20,13.6,12,10.7,9.63,6.41,4.96
,4.16,3.06,2.49};

```



```
float lmax[16] =
{8.77,9.25,9.67,9.74,9.31,8.62,7.97,6.72,6.59,5.62,5.22,3.9
6,3.54,2.33,1.75,1.45};
float cpmax2[16] = {0,-0.0118,-0.0127,-0.0152,-
0.0044,0.0030,-0.0015,0.0092,0.0009,0.0053,0.0020,0.0026,-
0.0000,0.0007,0.0001,0};
float lo2[16] = {0,4.3172,1.9313,-13.8422,-1.1623,-
16.3085,15.9964,3.3229,-
0.4879,0.4289,0.1523,0.0598,0.0332,-0.0365,0.0409,0};
float lmax2[16] = {0,0.0071,-0.3885,-0.5531,-
0.3990,0.5893,-1.7180,2.6828,-2.2931,1.4497,-
0.0856,0.0931,-0.0853,0.0586,0.0022,0};
float cp, cpmaxb, lob, lmaxb, c, a, b;

cpmaxb = spline(betas,cpmax,cpmax2,beta);
lob = spline(betas,lo,lo2,beta);
lmaxb = spline(betas,lmax,lmax2,beta);
c=lob*lmaxb/(lob-lmaxb);
a=2*c*cpmaxb*exp(1+c/lob);
b=a/lob;
if((lambda>0) && (lambda<=lmaxb))
{
    cp=0.5*((a/lambda)-b)*exp(-c/lambda);
}
else if ((lambda>lmaxb) && (lambda<lob))
{
    cp=cpmaxb*(1-(((lambda-lmaxb)/(lob-lmaxb))*((lambda-
lmaxb)/(lob-lmaxb))));
}
else
{
    cp=0;
}
if (lambda>35)
    cp=0.001;
return(cp);
}
float spline(float* xa,float* ya,float* y2a,float x)
{
/*si y=y(x); ya_i = y(xa_i); y2a_i = y'(xa_i); esta
funcion devuelve el valor*/
/*de y(x) en x, usando interpolacion cúbica por splines
naturales (y'=0 en extremos)*/

int k,klo,khi;
float y,a,b,h;
klo=1;
khi=16;
while ((khi-klo)>1)
{
```

```
        k=0.5*(khi+klo);
        if (xa[k]>x)
            khi=k;
        else
            klo=k;
    }
    h=xa[khi]-xa[klo];
    a=(xa[khi]-x)/h;
    b=(x-xa[klo])/h;

    y=a*ya[klo]+b*ya[khi]+((a*a*a-a)*y2a[klo]+(b*b*b-
    b)*y2a[khi])*h*h/6;

    return(y);
}
float Calculo_Beta(float omega_t,float T)
{
/*Calculamos beta a partir de la velocidad angular de la
turbina (omega_t) vista
desde el eje de ALTA, y de la velocidad de referencia. Solo
es pasar por un PI*/

float e,s,u,integ,aux,beta;
static float e_1 = 0;
static float u_1 = 0;
static float integ_1 = 0;
static float exceso = 0;
static float aux_1 = 0;
static float beta_1 = 0;
float lim_variacion = 5.6*PERIODO;
float kp = 1;
float ki = 0.12;
float kr = 1/(5*ki);
float lim_sup = 36;
float lim_inf = -1;
e = (omega_t*30/3.141592)-V_ref;
/*El error lo metemos en un PI saturado y con antiwindup*/
integ = ki*e + kr*exceso;
u = u_1 + kp*(e - e_1) + 0.5*T*(integ + integ_1);

if(u > lim_sup)
{
    s = lim_sup;
}
else if(u < lim_inf)
{
    s = lim_inf;
}
else
{

```

```
        s = u;
    }
    /*Actualizacion de variables del PI*/
    exceso = s - u;
    u_1 = u;
    e_1 = e;
    integ_1 = integ;
    aux = s - beta_1;

    /*Bandas muertas*/
    if((aux > -1)&&(aux < 1))
    {
        aux = 0;
    }
    else if(aux > 1)
    {
        aux = aux - 1;
    }
    else if(aux < -1)
    {
        aux = aux - (-1);
    }

    aux = aux * 0.1;

    if((aux - aux_1) > lim_variacion)
    {
        aux = aux_1 + lim_variacion;
    }
    else if((aux_1 - aux) > lim_variacion)
    {
        aux = aux_1 - lim_variacion;
    }
    beta = beta_1 + 0.5*T*(aux + aux_1);
    aux_1 = aux;
    if(beta > 35)
    {
        beta = 35;
    }
    return(beta);
}
```

8.2 Algoritmo de control del inversor trinivel

A continuación mostramos el algoritmo de modulación del inversor trinivel, haciendo ver el equilibrado de condensadores mediante la obtención del signo de la corriente, el cálculo de los parámetros y constantes para los controles, el cálculo de las corrientes de fase de referencia de salida del inversor y ...

```

/***** Archivos de cabecera *****/
#include "math.h"
#include "stdio.h"

/***** Para nombrar como PSCAD (Fortran convention) *****/
typedef double real;
typedef long int integer;
typedef bool logical;

/***** Zona de las etiquetas *****/

/* Constantes */
#define PI 3.14159265
#define PI2_3 2.09439510
#define raiz1_3 0.57735027
#define raiz1_2 0.70710678
#define raiz1_6 0.40824829
#define raiz2_3 0.81649658
#define fs 50.0
#define PERIODO 1./5000. // periodo de ejecución
de la modulación

/* Filtrados */
#define f_corte 600.0 // Esta frecuencia
se encuentra dada en rad/s
#define w1 2.0*PI*1500.0 // Esta es la frecuencia de
corte del filtro de tensiones de condensadores
#define wcond 2.0*PI*1000.0 // Frecuencia de filtrado de
tension suma de condensadores
#define WS 2.*PI*50. // Frecuencia de
filtrado del PLL

/* Controladores */
#define kps .01
#define kis 10.
#define k1 10.
#define kvs 20.e-5

#define kpd .1
#define kid 10.
#define dif_limit 0.5

/* Compilaciones condicionales */
//#define equilibrado1

extern "C" void control(real* va,real* vb,real* vc,real*
ia,real* ib,real* ic,real* vc1,real* vc2,real* vdcref,real*
```



```
dispa,real* dispb,real* disp,real* depur,real DELT,logical
TIMEZERO,real TIME)
{
/***** Definición de variables *****/
  static real Ts;
  static real NoCiclos;
  static int cuenta;

  /* Modulacion */
  static int a,b,c;
  static int Ia,Ib,Ic;
  static int IIa,IIb,IIc;
  static int IIIa,IIIb,IIIc;
  static int IVa,IVb,IVc;
  static int caso;
  static float t1,t2,t3,t4;
  static float da,db,dc;
  static float dalfa,dbeta,dgamma;

  /* Coeficientes de filtrado */
  static float c11,c12,c13,c31,c32,c33;
  static float n1,n2,n3;

  /* PI de suma de tensiones */
  static float error_Vdc,error_Vdcl,Ierror_Vdc,
  Perror_Vdc, Perror_Vdcl;
  static float kisl;
  static float Pcond;

  /* PI de diferencia de tensiones */
  static float error_vcc, error_vcc_1, Ierror_vcc,
  Ierror_vcc_1, Iocond, Io_dif;
  static float signog=1.;
  static float kidl;

  /* Tensiones de condensadores y filtrados */
  static float
  lvc1,lvc1_1,lvc2,lvc2_1,lvc1_f,lvc1_f1,lvc2_f,lvc2_f1;
  static float Vcond,Vcond1,Vcond_f,Vcond_f1,Inv_Vcond;
  static float lvdcref;

  /* Tensiones de red y filtradas */
  static float Vr,Vs,Vt;
  static float valfa,vbeta;

  /* Corrientes de red y filtradas */
  static float ialfa,ibeta;
  static float Iu,Iv,Iw;
  static float ialfa_ref,ibeta_ref;
  static float ialfa_c,ibeta_c;
```



```
n2 = 2.0 - f_corte*PERIODO;
n3 = 1.0/(2.0+f_corte*PERIODO);
/* Pasabajas del filtro de tensión de
condensadores (cada una)*/
c11 = w1*PERIODO;
c12 = 2.0 - w1*PERIODO;
c13 = 1.0/(2.0 + w1*PERIODO);
/* Pasabajas del filtro de tensión de
condensadores (suma)*/
c31 = wcond*PERIODO;
c32 = 2.0 - wcond*PERIODO;
c33 = 1.0/(2.0 + wcond*PERIODO);
}
cuenta+=1;

if(TIME<0.02) // Rseteo inicial de algunas
variables
{
    /******
    /* Inicialización de variables */
    /******
/* Esperamos 0.02 segundos a que se establezca el
permanente */
/* El objetivo es evitar el transitorio por carga de
condensadores */

// Vamos actualizando el valor de inicio de rampa
lvdceref = ((*vc1))+(*vc2))*1.0e3;
// Mantenemos inicializados los valores de los filtros
lvcl = *vc1*1000.0;
lvcl_1 = *vc1*1000.0;
lvc2 = *vc2*1000.0;
lvc2_1 = *vc2*1000.0;
lvcl_f1 = *vc1*1000.0;
lvc2_f1 = *vc2*1000.0;
}
else
{

if(cuenta<NoCiclos)//Sacamos las señales de puerta
{
    /******
    /* Sacamos los disparos correspondientes */
    /******
// Sacamos los disparos correspondientes
if(TIME<=t1)
{
    // Estamos en el primer estado
//Rama a
if(Ia==0)
```

```
{
    // Rama a tensión mínima
    *(dispa) = 0.0;
    *(dispa+1) = 0.0;
    *(dispa+2) = 1.0;
    *(dispa+3) = 1.0;
}
else if(Ia==1)
{
    // Rama a tensión intermedia
    *(dispa) = 0.0;
    *(dispa+1) = 1.0;
    *(dispa+2) = 1.0;
    *(dispa+3) = 0.0;
}
else
{
    // Rama a tensión mayor
    *(dispa) = 1.0;
    *(dispa+1) = 1.0;
    *(dispa+2) = 0.0;
    *(dispa+3) = 0.0;
}
// Rama b
if(Ib==0)
{
    // Rama a tensión mínima
    *(dispb) = 0.0;
    *(dispb+1) = 0.0;
    *(dispb+2) = 1.0;
    *(dispb+3) = 1.0;
}
else if(Ib==1)
{
    // Rama a tensión intermedia
    *(dispb) = 0.0;
    *(dispb+1) = 1.0;
    *(dispb+2) = 1.0;
    *(dispb+3) = 0.0;
}
else
{
    // Rama a tensión mayor
    *(dispb) = 1.0;
    *(dispb+1) = 1.0;
    *(dispb+2) = 0.0;
    *(dispb+3) = 0.0;
}
// Rama c
if(Ic==0)
```

```
{
    //Rama a tensión mínima
    *(dispc) = 0.0;
    *(dispc+1) = 0.0;
    *(dispc+2) = 1.0;
    *(dispc+3) = 1.0;
}
else if(Ic==1)
{
    //Rama a tensión intermedia
    *(dispc) = 0.0;
    *(dispc+1) = 1.0;
    *(dispc+2) = 1.0;
    *(dispc+3) = 0.0;
}
else
{
    //Rama a tensión mayor
    *(dispc) = 1.0;
    *(dispc+1) = 1.0;
    *(dispc+2) = 0.0;
    *(dispc+3) = 0.0;
}
}
else if((TIME<=(t2))&(TIME>t1))
{
    // Estamos en el segundo estado

    //Rama a
    if(IIa==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispa) = 0.0;
        *(dispa+1) = 0.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 1.0;
    }
    else if(IIa==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispa) = 0.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispa) = 1.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
    }
}
```

```
        *(dispa+2) = 0.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    // Rama b
    if(IIb==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispb) = 0.0;
        *(dispb+1) = 0.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 1.0;
    }
    else if(IIb==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispb) = 0.0;
        *(dispb+1) = 1.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispb) = 1.0;
        *(dispb+1) = 1.0;
        *(dispb+2) = 0.0;
        *(dispb+3) = 0.0;
    }
    //Rama c
    if(IIc==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispc) = 0.0;
        *(dispc+1) = 0.0;
        *(dispc+2) = 1.0;
        *(dispc+3) = 1.0;
    }
    else if(IIc==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispc) = 0.0;
        *(dispc+1) = 1.0;
        *(dispc+2) = 1.0;
        *(dispc+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispc) = 1.0;
        *(dispc+1) = 1.0;
    }
}
```

```
        *(dispc+2) = 0.0;
        *(dispc+3) = 0.0;
    }
}
else if((TIME<=t3)&(TIME>t2))
{
    // Estamos en el tercer estado

    //Rama a
    if(IIIa==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispa)   = 0.0;
        *(dispa+1) = 0.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 1.0;
    }
    else if(IIIa==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispa)   = 0.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispa)   = 1.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
        *(dispa+2) = 0.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    // Rama b
    if(IIIb==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispb)   = 0.0;
        *(dispb+1) = 0.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 1.0;
    }
    else if(IIIb==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispb)   = 0.0;
        *(dispb+1) = 1.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 0.0;
    }
}
```

```
else
{
    //Rama a tensión mayor
    *(dispb) = 1.0;
    *(dispb+1) = 1.0;
    *(dispb+2) = 0.0;
    *(dispb+3) = 0.0;
}
//Rama c
if(IIIc==0)
{
    //Rama a tensión mínima
    *(dispc) = 0.0;
    *(dispc+1) = 0.0;
    *(dispc+2) = 1.0;
    *(dispc+3) = 1.0;
}
else if(IIIc==1)
{
    //Rama a tensión intermedia
    *(dispc) = 0.0;
    *(dispc+1) = 1.0;
    *(dispc+2) = 1.0;
    *(dispc+3) = 0.0;
}
else
{
    //Rama a tensión mayor
    *(dispc) = 1.0;
    *(dispc+1) = 1.0;
    *(dispc+2) = 0.0;
    *(dispc+3) = 0.0;
}
}
else
{
    // Estamos en el cuarto estado

    //Rama a
    if(IVa==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispa) = 0.0;
        *(dispa+1) = 0.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 1.0;
    }
    else if(IVa==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
```

```
        *(dispa)    = 0.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
        *(dispa+2) = 1.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispa)    = 1.0;
        *(dispa+1) = 1.0;
        *(dispa+2) = 0.0;
        *(dispa+3) = 0.0;
    }
    // Rama b
    if(IVb==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispb)    = 0.0;
        *(dispb+1) = 0.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 1.0;
    }
    else if(IVb==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
        *(dispb)    = 0.0;
        *(dispb+1) = 1.0;
        *(dispb+2) = 1.0;
        *(dispb+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispb)    = 1.0;
        *(dispb+1) = 1.0;
        *(dispb+2) = 0.0;
        *(dispb+3) = 0.0;
    }
    //Rama c
    if(IVc==0)
    {
        //Rama a tensión mínima
        *(dispc)    = 0.0;
        *(dispc+1) = 0.0;
        *(dispc+2) = 1.0;
        *(dispc+3) = 1.0;
    }
    else if(IVc==1)
    {
        //Rama a tensión intermedia
```

```
        *(dispc)    = 0.0;
        *(dispc+1) = 1.0;
        *(dispc+2) = 1.0;
        *(dispc+3) = 0.0;
    }
    else
    {
        //Rama a tensión mayor
        *(dispc)    = 1.0;
        *(dispc+1) = 1.0;
        *(dispc+2) = 0.0;
        *(dispc+3) = 0.0;
    }
}
}
else //Ciclo de muestreo y control
{
    cuenta=0; //Reseteo del contador de pasos de
integración hasta periodo de control

    /******
    /* Rampa de la tension de referencia de CC */
    /******
        if (lvdcref!=*(vdcref)*1000.0)
        {
            // Son distintas y hay cambiar el valor local
            if(lvdcref<*(vdcref)*1000.0)
            {
                // La variable local es menor, así que se incrementa
                lvdcref+=1000.0*PERIODO; // 500
voltage por segundo
            }
            else
            {
                // La variable local es mayor, así que se decrementa
                lvdcref-=1000.0*PERIODO;
            }
        }
    }
    /******
    /* Filtrado de las tensiones medidas de los condensadores
    /******
        lvc1=*(vc1)*1000.0; //Localmente
trabajamos todo en V y A
        lvc2=*(vc2)*1000.0;
        lvc1_f = (c11*(lvc1+lvc1_1) +
        c12*lvc1_f1)*c13; //Filtro paso bajo sobre
vc1 y vc2
        lvc2_f = (c11*(lvc2+lvc2_1) +
        c12*lvc2_f1)*c13;
        lvc1_1 = lvc1;
```

```

lvc2_1 = lvc2;
lvcl_f1 = lvcl_f;
lvc2_f1 = lvc2_f;
Vcond = lvcl + lvc2; //Como vemos Vcond es
la tensión total filtrada como vcl y vc2
Inv_Vcond = 1./Vcond;
//Inv_Vcond = 1./lvdceref; // como está en
GERP5
Vcond_f = (c31*(Vcond+Vcond1) +
c32*Vcond_f1)*c33;
Vcond_f1 = Vcond_f;
Vcond1 = Vcond;
Vcond = Vcond_f; // como está en GERP5

depur[10] = Vcond;

/*****/
/* Tensiones de red */
/*****/
Vr = *va*1000.0;
Vs = *vb*1000.0;
Vt = *vc*1000.0;

/*****/
/* Corrientes de red */
/*****/
Iu = *ia*1000.;
Iv = *ib*1000.;
Iw = *ic*1000.;

/*****/
/* Calculo valfa vbeta de red */
/*****/
valfa = raiz2_3*(Vr)-raiz1_6*(Vs+Vt);
vbeta = raiz1_2*(Vs-Vt);

/*****/
/* Calculo ialfa ibeta de red */
/*****/
ialfa_c = raiz2_3*(-Iu)-raiz1_6*(-Iv-Iw);
ibeta_c = raiz1_2*(-Iv+Iw);

/*****/
/* PI de tension de condensadores */
/*****/
//error_Vdc = lvdceref*lvdceref - Vcond*Vcond; //
Con este criterio es potencia a inyectar en condensadores
//Ierror_Vdc += (error_Vdc +
error_Vdc1)*0.5;

```

```

//Perror_Vdc =
(n1*(error_Vdc+error_Vdc1)+n2*Perror_Vdc1)*n
3; // Proporcional y filtro paso bajo
//Pcond = Perror_Vdc + kisl*Ierror_Vdc;
//error_Vdc1 = error_Vdc;
//Perror_Vdc1 = Perror_Vdc;

Pcond = 9200;

/*****/
/* Calculo de las corrientes de referencia por Pcond */
/*****/
ialfa_ref = Pcond*kvs*valfa;
ibeta_ref = Pcond*kvs*vbeta;

depur[4] = -raiz2_3*ialfa_ref*0.001;
depur[5] = raiz1_6*ialfa_ref*0.001 -
raiz1_2*ibeta_ref*0.001;
depur[6] = raiz1_6*ialfa_ref*0.001 +
raiz1_2*ibeta_ref*0.001;

/*****/
/* Calculo de las acciones de control alfa y beta */
/*****/
dalfa = (k1*(ialfa_c-
Pcond*kvs*valfa)+valfa)*Inv_Vcond*2;
dbeta = (k1*(ibeta_c-
Pcond*kvs*vbeta)+vbeta)*Inv_Vcond*2;

/*****/
/* PI de diferencia de condensadores */
/*****/
if(Pcond>0) signog=1.; // En función del
signo de la potencia se suma o resta homopolar
else signog=-1.;

error_vcc=(lvcl_f-lvc2_f)*0.5;
Ierror_vcc += (error_vcc + error_vcc_1) *
0.5;
Iocond = kpd * error_vcc + kidl *
Ierror_vcc;
dgamma=Iocond*signog;
if(dgamma>dif_limit) dgamma=dif_limit;
if(dgamma<-dif_limit) dgamma=-dif_limit;
error_vcc_1=error_vcc;
#ifdef equilibrado1
dgamma = 0;
#endif

/*****/

```

```

/* Calculo de las acciones de control en abc */
/*****/
    da = raiz2_3*dalfa + raiz1_3*dgamma;
    db = -raiz1_6*dalfa + raiz1_2*dbeta +
    raiz1_3*dgamma;
    dc = -raiz1_6*dalfa - raiz1_2*dbeta +
    raiz1_3*dgamma;
//Traslación respecto de origen
da += 1.0;
db += 1.0;
dc += 1.0;
//Saturación
if(da>2.) da=2.;
if(db>2.) db=2.;
if(dc>2.) dc=2.;
if(da<0.) da=0.;
if(db<0.) db=0.;
if(dc<0.) dc=0.;

depur[7] = da;
depur[8] = db;
depur[9] = dc;

/*****/
/* Modulación usando 3D-SPVM */
/*****/

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PASO 1: Determinar las coordenadas del vertice de
referencia del subcubo donde se encuentra el vector de
referencia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if (da>1.) a=1;
    else a=0;
    if (db>1.) b=1;
    else b=0;
    if (dc>1.) c=1;
    else c=0;
    /*

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PASO 2: Determinar el tetraedro donde se encuentra el
vector de referencia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    */
    if (db<=dc+(b-c))
    {
// Estamos en la mitad inferior del cubo, caso 1.
        if (da>=dc+(a-c))
        {
            // Estamos en el caso 1.1

```

```
Ia    = a;
Ib    = b;
Ic    = c;
IIa   = a+1;
IIb   = b;
IIc   = c;
IIIa  = a+1;
IIIb  = b;
IIIC  = c+1;
IVa   = a+1;
IVb   = b+1;
IVc   = c+1;

    caso=11;
}
else if (db<=da+(b-a))
{
    // Estamos en el caso 1.2
    Ia    = a;
    Ib    = b;
    Ic    = c;
    IIa   = a;
    IIb   = b;
    IIC   = c+1;
    IIIa  = a+1;
    IIIb  = b;
    IIIC  = c+1;
    IVa   = a+1;
    IVb   = b+1;
    IVc   = c+1;

    caso=12;
}
else
{
    // Estamos en el caso restante, 1.3
    Ia    = a;
    Ib    = b;
    Ic    = c;
    IIa   = a;
    IIb   = b;
    IIC   = c+1;
    IIIa  = a;
    IIIb  = b+1;
    IIIC  = c+1;
    IVa   = a+1;
    IVb   = b+1;
    IVc   = c+1;

    caso=13;
```

```
    }
  }
  else
  {
    // Estamos en la mitad superior del cubo, caso 2.
    if (da<=dc+(a-c))
    {
      // Estamos en el caso 2.1
      Ia  = a;
      Ib  = b;
      Ic  = c;
      IIa = a;
      IIb = b+1;
      IIc = c;
      IIIa = a;
      IIIb = b+1;
      IIIc = c+1;
      IVa = a+1;
      IVb = b+1;
      IVc = c+1;

      caso=21;
    }
    else if (db>=da+(b-a))
    {
      // Estamos en el caso 2.2
      Ia  = a;
      Ib  = b;
      Ic  = c;
      IIa = a;
      IIb = b+1;
      IIc = c;
      IIIa = a+1;
      IIIb = b+1;
      IIIc = c;
      IVa = a+1;
      IVb = b+1;
      IVc = c+1;

      caso=22;
    }
    else
    {
      // Estamos en el caso restante, 2.3
      Ia  = a;
      Ib  = b;
      Ic  = c;
      IIa = a+1;
      IIb = b;
      IIc = c;
    }
  }
}
```

```

        IIIa = a+1;
        IIIb = b+1;
        IIIc = c;
        IVa  = a+1;
        IVb  = b+1;
        IVc  = c+1;

        caso=23;
    }
}
/*
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PASO 3: En funcion de los estados y de los vectores de
referencia calcular los tiempos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
switch (caso)
{
    case 11:
        t1=1.+(float)a-da;
        t2=-(float)a+(float)c+da-dc;
        t3=(float)b-(float)c-db+dc;
        t4=-(float)b+db;
        break;
    case 12:
        t1=1.+(float)c-dc;
        t2=(float)a-(float)c-da+dc;
        t3=-(float)a+(float)b+da-db;
        t4=-(float)b+db;
        break;
    case 13:
        t1=1.+(float)c-dc;
        t2=(float)b-(float)c-db+dc;
        t3=(float)a-(float)b-da+db;
        t4=-(float)a+da;
        break;
    case 21:
        t1=1.+(float)b-db;
        t2=-(float)b+(float)c+db-dc;
        t3=(float)a-(float)c-da+dc;
        t4=-(float)a+da;
        break;
    case 22:
        t1=1.+(float)b-db;
        t2=(float)a-(float)b-da+db;
        t3=-(float)a+(float)c+da-dc;
        t4=-(float)c+dc;
        break;
    case 23:
        t1=1.+(float)a-da;
        t2=-(float)a+(float)b+da-db;

```

```

        t3=- (float)b+(float)c+db-dc;
        t4=- (float)c+dc;
        break;
    default:
        break;
}
// Ahora paso los duty cicles a tiempo absoluto
t1 = TIME + t1*PERIODO;
t2 = t1 + t2*PERIODO;
t3 = t2 + t3*PERIODO;
t4 = t3 + t4*PERIODO;
#ifdef    equilibrado1
/*****
/* Equilibrado del punto medio tradicional*/
*****/
// Primer estado
if((Ia!=2)&(Ib!=2)&(Ic!=2))
{
    float io=0;
    if(Ia==1) io+=Iu;
    if(Ib==1) io+=Iv;
    if(Ic==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
        if(lvc1>lvc2)
        {
            Ia++;
            Ib++;
            Ic++;
        }
    }
    else
    {
        if(lvc1<lvc2)
        {
            Ia++;
            Ib++;
            Ic++;
        }
    }
}
if((Ia!=0)&(Ib!=0)&(Ic!=0))
{
    float io=0;
    if(Ia==1) io+=Iu;
    if(Ib==1) io+=Iv;
    if(Ic==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
        if(lvc1>lvc2)

```

```
        {
            Ia--;
            Ib--;
            Ic--;
        }
    }
else
{
    if(lvc1<lvc2)
    {
        Ia--;
        Ib--;
        Ic--;
    }
}
// Segundo estado
if((IIa!=2)&(IIb!=2)&(IIc!=2))
{
    float io=0;
    if(IIa==1) io+=Iu;
    if(IIb==1) io+=Iv;
    if(IIc==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
        if(lvc1>lvc2)
        {
            IIa++;
            IIb++;
            IIc++;
        }
    }
else
{
    if(lvc1<lvc2)
    {
        IIa++;
        IIb++;
        IIc++;
    }
}
}
if((IIa!=0)&(IIb!=0)&(IIc!=0))
{
    float io=0;
    if(IIa==1) io+=Iu;
    if(IIb==1) io+=Iv;
    if(IIc==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
```

```
        if(lvc1>lvc2)
        {
            IIa--;
            IIb--;
            IIc--;
        }
    }
else
{
    if(lvc1<lvc2)
    {
        IIa--;
        IIb--;
        IIc--;
    }
}
// Tercer estado
if((IIIa!=2)&(IIIb!=2)&(IIIc!=2))
{
    float io=0;
    if(IIIa==1) io+=Iu;
    if(IIIb==1) io+=Iv;
    if(IIIc==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
        if(lvc1>lvc2)
        {
            IIIa++;
            IIIb++;
            IIIc++;
        }
    }
else
{
    if(lvc1>lvc2)
    {
        IIIa++;
        IIIb++;
        IIIc++;
    }
}
if((IIIa!=0)&(IIIb!=0)&(IIIc!=0))
{
    float io=0;
    if(IIIa==1) io+=Iu;
    if(IIIb==1) io+=Iv;
    if(IIIc==1) io+=Iw;
    if(io>0)
```

```
        {
            if(lvc1>lvc2)
            {
                IIIa--;
                IIIb--;
                IIIc--;
            }
        }
    else
    {
        if(lvc1<lvc2)
        {
            IIIa--;
            IIIb--;
            IIIc--;
        }
    }
}
// Cuarto estado
if((IVa!=2)&(IVb!=2)&(IVc!=2))
{
    float io=0;
    if(IVa==1) io+=Iu;
    if(IVb==1) io+=Iv;
    if(IVc==1) io+=Iw;
    if(io>0)
    {
        if(lvc1>lvc2)
        {
            IVa++;
            IVb++;
            IVc++;
        }
    }
    else
    {
        if(lvc1<lvc2)
        {
            IVa++;
            IVb++;
            IVc++;
        }
    }
}
if((IVa!=0)&(IVb!=0)&(IVc!=0))
{
    float io=0;
    if(IVa==1) io+=Iu;
    if(IVb==1) io+=Iv;
    if(IVc==1) io+=Iw;
```

```
        if(io>0)
        {
            if(lvc1>lvc2)
            {
                IVa--;
                IVb--;
                IVc--;
            }
        }
        else
        {
            if(lvc1<lvc2)
            {
                IVa--;
                IVb--;
                IVc--;
            }
        }
    }
#endif
}
    }
    depur[0] = ialfa_ref;
    depur[1] = ibeta_ref;
    depur[2] = ialfa_c;
    depur[3] = ibeta_c;
}
```

9. CONCLUSIONES Y BENEFICIOS POTENCIALES

Se viene desarrollando una actividad de I+D relevante en el campo de la electrónica de potencia y en particular en su uso para la integración de las fuentes de energía renovables en la red eléctrica. Esta actividad se materializa en el desarrollo de nuevos productos electrónicos y en proyectos de investigación aplicada para diferentes empresas del Sector Energético.

Una de las principales líneas de trabajo son los convertidores de potencia y, en especial, los convertidores multinivel. Estos últimos presentan interesantes ventajas sobre las soluciones tradicionales para la conversión de energía procedente de fuentes renovables.

En un convertidor trinivel, la onda de tensión alterna se construye a partir de más niveles de tensión de continua, en comparación con los convertidores de dos niveles (Fig. 85). De esta forma, los saltos de tensión ΔV en la parte de alterna del convertidor disminuyen a medida que aumenta el número de niveles. Esta importante característica se traduce en diferentes ventajas como son la mejora de la calidad de la onda de tensión, la reducción del rizado de corriente o la posibilidad de trabajar a una tensión elevada con tensiones de conmutación reducidas en cada interruptor. En función de la aplicación a abordar se tratará de potenciar una ventaja frente a las otras.

Así por ejemplo, para el caso de un inversor fotovoltaico puede ser interesante reducir el valor de las inductancias de conexión a red, con la consiguiente reducción de costes, como consecuencia de una disminución de los niveles de rizado de la corriente de salida. En el caso de las grandes turbinas eólicas parece más importante la capacidad de los convertidores multinivel de trabajar a mayores tensiones para abordar mayores potencias, manteniendo la intensidad.

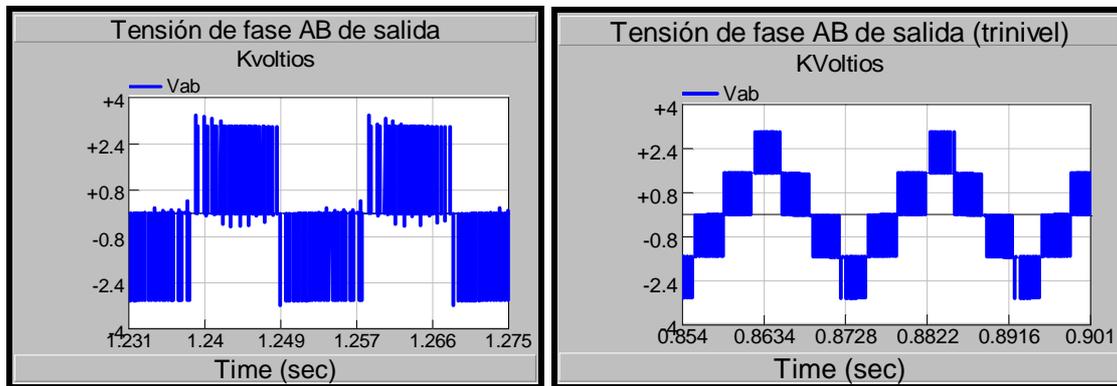


Ilustración 86. Forma de la tensión de salida. a) 2 niveles. b) 3 niveles.

Como ya se ha comentado, otra característica de los convertidores multinivel es que, optimizando la estrategia de control, se puede reducir notablemente la frecuencia de conmutación de cada interruptor, lo que implica una disminución de las pérdidas de conmutación y el consiguiente aumento de la eficiencia. En la Fig. 86 se muestra cómo la curva de rendimiento de un convertidor multinivel es mejor que la de un convertidor de dos niveles en todo el rango de potencia, siendo, en términos relativos, más acentuada en los niveles bajos de potencia.

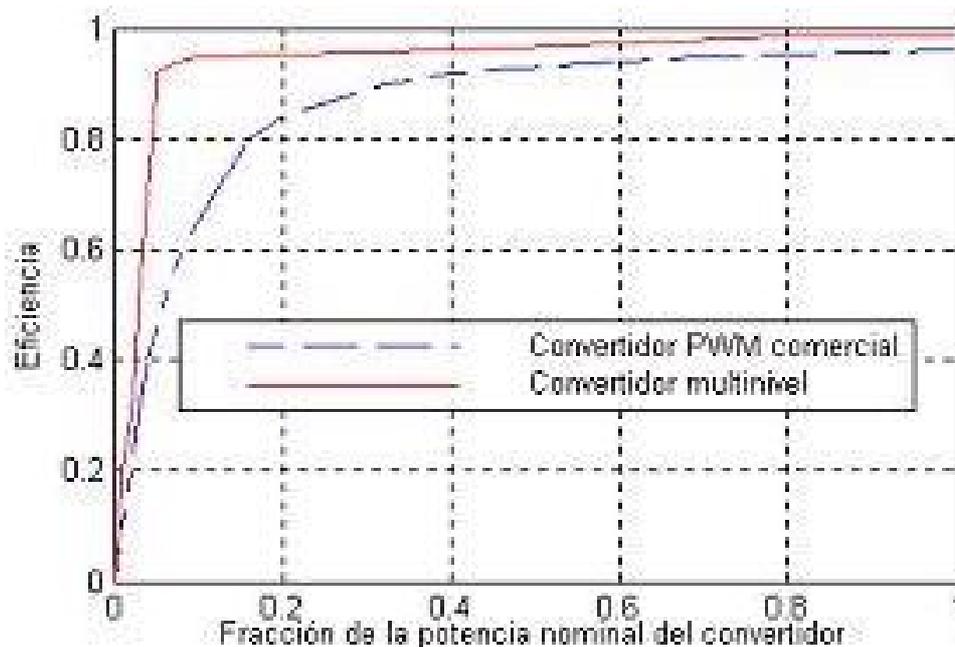


Ilustración 87. Curvas de eficiencia del convertidor multinivel frente al clásico con PWM.

Esta ventaja puede ser especialmente interesante en el caso de energías renovables debido a su mayor integración de rendimiento-coste en generadores de energía



eléctrica. En el caso de la energía eólica, la naturaleza cambiante del viento implica que la potencia generada será muy variable incluso en un mismo día, obligando de nuevo al convertidor a trabajar a potencias inferiores a la nominal de diseño.

Sin embargo, los convertidores multinivel plantean algunos inconvenientes que limitan su utilización práctica, asociados fundamentalmente al mayor número de dispositivos de conmutación que requiere este tipo de topología frente a los convertidores tradicionales. Estos inconvenientes se resumen en una mayor complejidad de los sistemas de control y en un incremento de los costes. En el primer caso, el problema se ve atenuado por el importante esfuerzo realizado en los últimos años por diferentes grupos de investigación para aportar soluciones al control de convertidores multinivel. Esta labor de investigación, junto con los avances en dispositivos de control – microcontroladores y procesadores digitales de señal cada vez potentes– permiten augurar una utilización creciente de las topologías multinivel.

El segundo aspecto negativo de los convertidores multinivel, referente a los costes, empieza a no pesar tanto como consecuencia de una progresiva reducción de los precios en los dispositivos de conmutación y en función de la aplicación para la que se diseñe el convertidor multinivel, el incremento de costes puede estar justificado.

ANEXO I (English)
ENTORNO DE SIMULACIÓN PSCAD/EMTDC

In the initial stage, familiarization of the software and understanding the operations involved in the software in order to conduct the project is necessary. The PSCAD/EMTDC software is used on this memory.

PSCAD is a group of programs which provides a flexible interface to electromagnetic transient simulation based on EMTDC.

1. Introduction PSCAD/EMTDC software

PSCAD®/ EMTDC® Software

The behaviour of a power system under certain condition plays an important part in the design of the system itself. For example, the behaviour of a power system network under severe overvoltages due to a fault in the network is critical in the design of the protection system in the network, and so on. In certain cases, these conditions are best analysed before they occur in the power system network. That is why the simulation using computer softwares comes into the picture. PSCAD® stands for Power Systems Computer Aided Design. It is used as a GUI (Graphical User Interface) for EMTDC. It is a powerful graphical user interface which increases productivity in undertaking simulation of electromagnetic transients studies of electrical power systems. PSCAD has many advanced features to boost productivity, including intelligent data forms, interactive control and feedback, up to-date documentation of the circuit along with plots and comments, context sensitive help, hierarchical designs, and multiple levels of zooming. The software also serves as the front end for the RTDS (Real Time Digital Simulator). EMTDC® stands for ElectroMagnetic Transient for DC. It was first engineered by Dennis Woodford in 1975 since at that time the existing tools were not comprehensive and flexible to study the Manitoba Hydro Nelson River HVDC Power System in Manitoba, Canada. The well-known Dommel Algorithm is used in EMTDC software. The program structure has been developed so as to allow the user great flexibility in modelling power systems and their associated controls in great detail.

An interpolation algorithm has been included to permit accurate modelling of switching devices such as thyristors and GTO's. The solution of very larger power systems has been made efficient by allowing networks to be separated into smaller sub-networks connected by transmission lines. Solutions of these individual subsystems have been made efficient by use of Gaussian Elimination sparse matrix techniques.

PSCAD / EMTDC is a software simulation tool for studying the transient behaviour of electrical networks. This software was first developed in 1976. The software comes with a comprehensive library of electrical models consisting of all aspects of AC and DC power systems and controls. Users are also able to create their own model and libraries using the built-in graphical Component Workshop in the software. Moreover, EMTDC supports models written in FORTRAN / C/C++ which made the construction of models easy. The resources of user's computer are the only limitation to the size of the circuit to be simulated in PSCAD / EMTDC software.

The software supports all aspects of conducting a simulation including circuit assembly, run-time control, analysis, and reporting. In 1988 PSCAD V1 was first introduced on Apollo workstations. The rapid development of the software brought the introduction of PSCAD V2 in 1994, which operates under Unix system. In 1999 PSCAD V3 was released and it operates under Windows platform.

The scope of simulation studies that can be conducted using PSCAD/EMTDC software is as follows:

- ◆ General power system electromagnetic transient studies,
- ◆ Overvoltages in a power system due to a fault or breaker operation,
- ◆ DC transmission systems and detailed controls,
- ◆ Synchronous and induction machine torsional effects and self-excitation,
- ◆ Static Var Compensators,
- ◆ Harmonic interactions,
- ◆ Relay protection studies,
- ◆ And many more.

2. Tools using on PSCAD/EMTDC

FILEMANAGER

The main window that appears when the user runs PSCAD is the File Manager software module. The user's database were presented in a project / case / file hierarchy so that the usual database maintenance tasks such as file editing, copying, deleting, and so on can be performed easily and directly from the File Manager.



Moreover, other PSCAD software modules can be initiated by clicking on the appropriate button on the top right hand screen of the File Manager and each individual modules that are currently running is shown as icons on the right hand side of the File Manager screen under .process icons label.

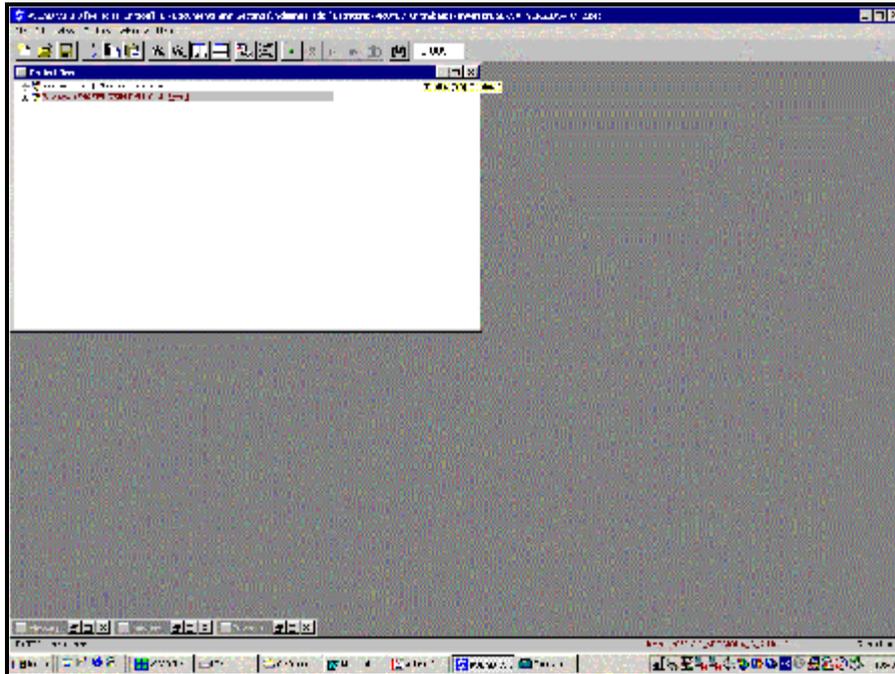


Ilustración 88. File Manager software module

DRAFT

The Draft module is where the users are able to graphically create their power system models which are to be simulated. Simulation using either EMTDC or the RTDS can be performed in the Draft module.

Electrical components of power systems are located on the library palette which is on the right hand side of the Draft window. Users copy the desired components and place them onto the canvas which is on the left hand side of the Draft window followed by the appearance of the parameter menu of that particular component. In the case where a large number of components are to be implemented onto the canvas, users are able to create a sub-circuit which can be link together by exporting the variables that are needed. Once the user has completed the layout, it can be printed either by a PostScript based laser printer or plotter capable of accepting HPGL commands.

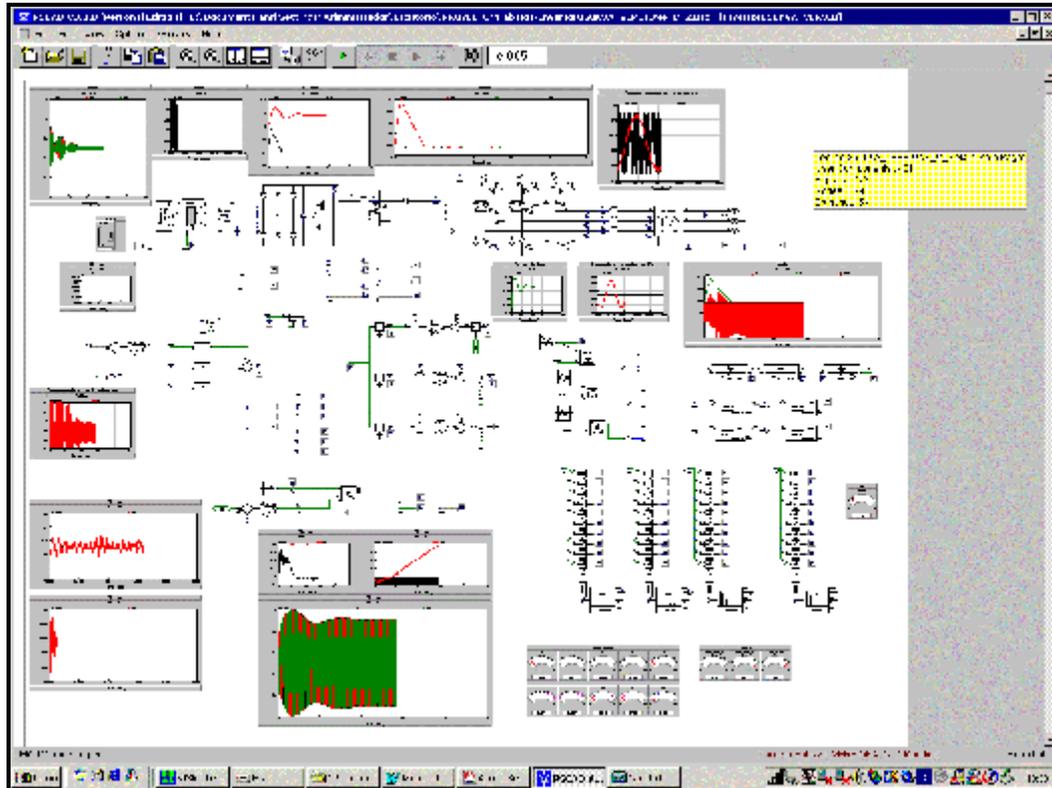


Ilustración 89. The DRAFT module

RUNTIME

The analysis of the user's circuit can be carried out in the Runtime module. Users are allowed to load, start, stop and analyse the specific parameters of their circuit in a form of on-line plotting of data as it is generated in the Runtime module. Valuable feedback from the simulation can be obtained regarding the transient or dynamic behaviour such as set-point changes, breaker action and fault.

MULTILOT

The generated data by either EMTDC or RTDS can be plotted and analysed in Multiplot module. It also enables scaling and general formatting of data.

Furthermore, Fourier analysis can be directly performed. Plots obtained from the Runtime module can be combined and manipulated into a single page for the ease of comparison. Moreover, some other features includes labelling, text editing, date and so on can be added into the plots.

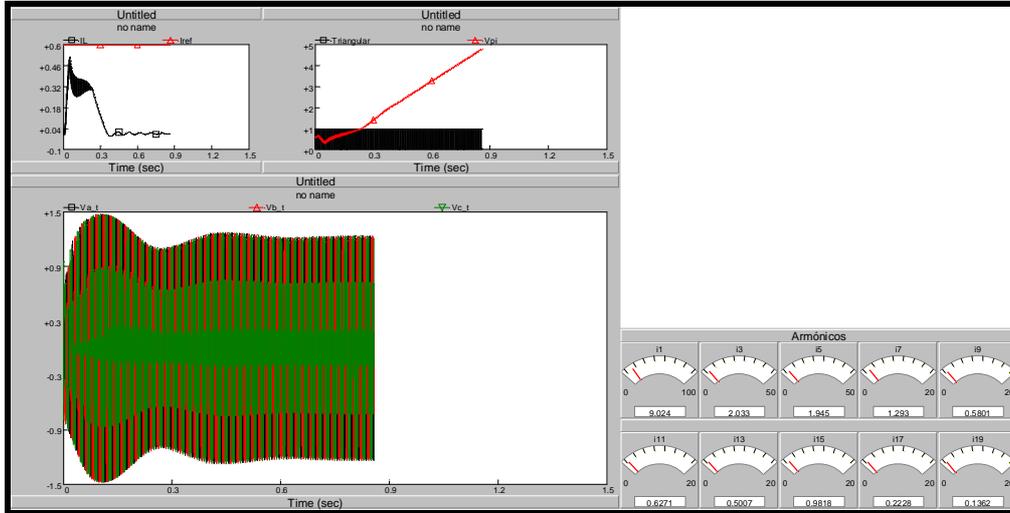


Ilustración 90. Some plots of the PSCAD software