

Tabla de contenido

1	Memoria.....	3
1.1	Introducción.....	5
1.2	Objetivo.....	7
1.3	Justificación.....	8
1.4	Tecnología de los parques eólicos offshore	9
1.4.1	Maquinas eléctricas de los aerogeneradores	9
1.4.2	Características técnicas de los parques eólicos offshore.....	11
1.4.3	Tecnologías para el enlace a la red general	12
1.4.4	Configuraciones de los parques eólicos offshore	15
1.5	Planteamiento y análisis de las alternativas de control de una red aislada offshore	19
1.5.1	Control Estrategia 1.....	20
1.5.2	Control Estrategia 2.....	22
1.5.3	Control de un inversor	24
1.6	Desarrollo del banco de pruebas.....	26
1.6.1	Elementos del circuito de control	26
1.6.2	Elementos del circuito de potencia.....	33
1.6.3	Fases del desarrollo.....	37
1.6.4	Circuito Eléctrico	38
1.6.5	Esquemas de control.....	39
2	Presupuesto.....	53
3	Anexos.....	57
3.1	Tutorial instalación y comunicación de Matlab y Code Composer	59

1 Memoria

1.1 Introducción

La demanda de energía ha descendido en los últimos años contrariamente a las previsiones anteriores a la recesión económica. El descenso ha llegado a situar la demanda al nivel del año 2005. Pero pese a que aparentemente la situación energética es similar, al analizar las aportaciones de cada una de las fuentes generadoras, se observan diferencias en la distribución.

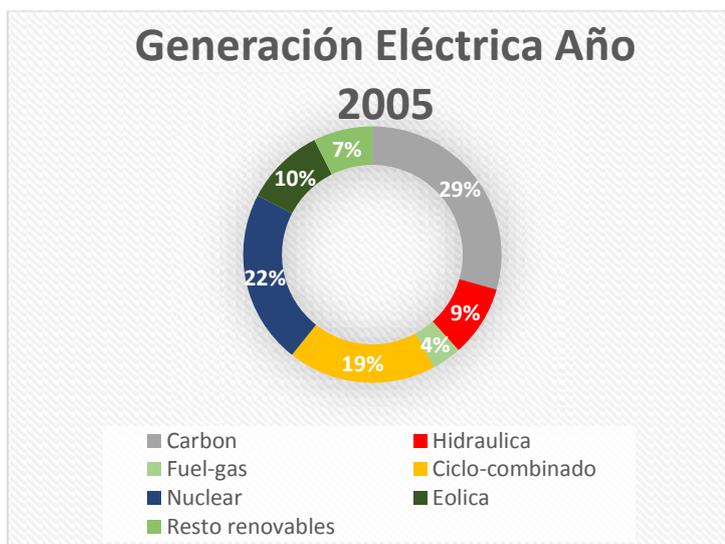


FIGURA 1 FUENTE REE

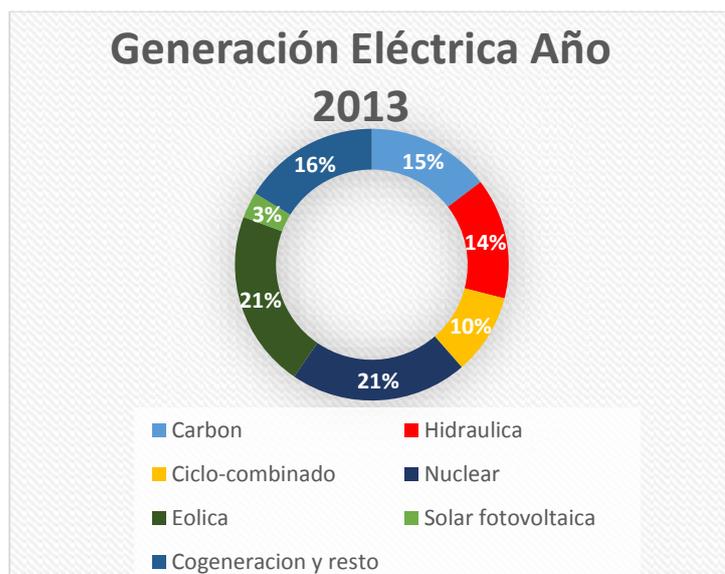


FIGURA 2 FUENTE REE

En el año 2005 las principales fuentes de energía fueron la nuclear, los ciclos combinados y las centrales térmicas de carbón, tal y como muestra la figura 1. Sin embargo en la figura 2, se puede apreciar que en el año 2013 la generación se encuentra notablemente más segmentada. Es considerable el decremento proporcional tanto del carbón como de los ciclos combinados, así como el aumento del peso en el sistema de los generadores eólicos. Estos han llegado a ser la principal fuente de energía durante el periodo del 2013, alcanzando una producción porcentual del 21,1% del total de la energía consumida.

Durante la búsqueda de una generación ecológica y sostenible se han construido parques eólicos en prácticamente la totalidad de emplazamientos viables económica y ecológicamente. De hecho en otros países como Dinamarca o Reino Unido la ocupación de las ubicaciones es tal que se comienza a emplear ya emplazamientos offshore, es decir en el mar. En algunos aspectos la ubicación del parque dentro del mar puede ser una ventaja, ya que los aerogeneradores offshore se benefician de las corrientes de aire creadas por la diferencia de temperaturas entre el mar y la tierra. Estas corrientes además de ser más predecibles pueden alcanzar velocidades de viento mayores al no existir obstáculos y ser menor la rugosidad del suelo. Un parque eólico offshore sin embargo implica dificultades adicionales en su desarrollo técnico. Debido a su emplazamiento supone en términos eléctricos un medio adverso creando necesidades especiales en algunos aspectos.

Uno de los elementos con cierta problemática, es la línea de transporte de la energía. Se suele recurrir a una línea de conexión de continua para este fin, debido a que trabajar con corriente continua elimina o disminuye algunos de los efectos que causan pérdidas energéticas, principalmente los efectos inductivos y capacitivos de las líneas. El efecto capacitivo se ve incrementado en gran medida al encontrarse el conductor enterrado en el fondo del mar, siendo de mayor interés disminuir su aparición. Esta tecnología implica añadir sin embargo otras dificultades como la pérdida de referencia de la red eléctrica. La figura 3 contiene un esquema de un parque eólico offshore con enlace de continua.

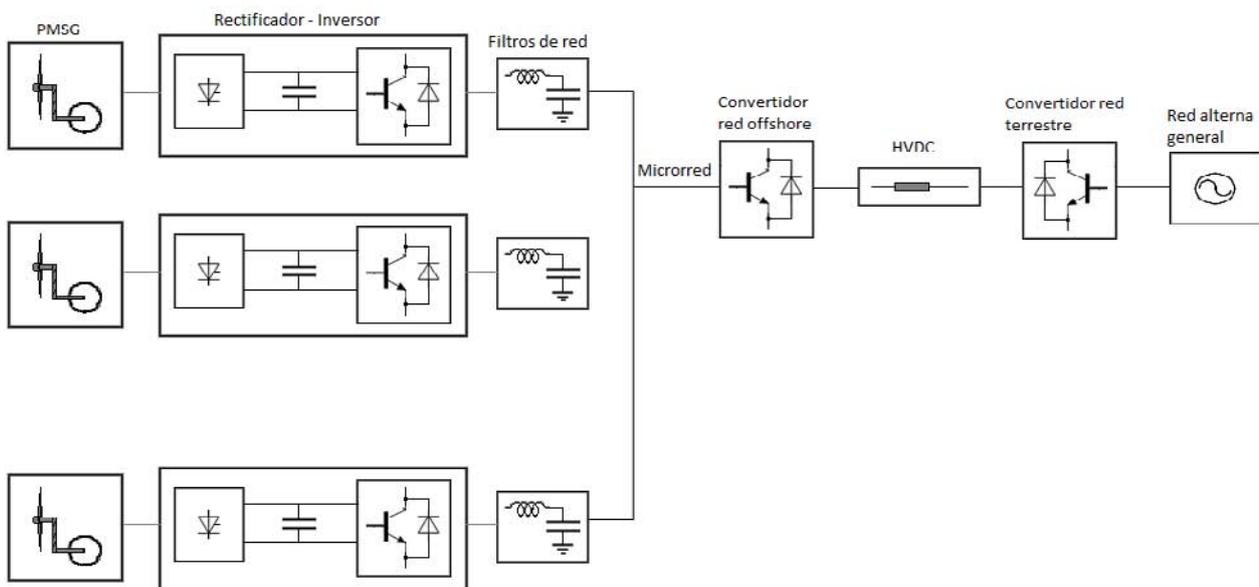


FIGURA 3 ESQUEMA GENERAL DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE

El hecho de perder la referencia de la red de transporte, fuerza a la creación de una red independiente de la red general, compuesta por los convertidores de los aerogeneradores que inyectan energía y el convertidor de continua que la extrae hacia el enlace de continua.

Para realizar el control de la red aislada, una de las posibles soluciones es el control por droops. En este tipo de control no existe un elemento principal establecido como referencia, todos los elementos contienen un control de frecuencia-potencia y tensión – potencia reactiva. De esta forma se debe conseguir la sincronización de los aerogeneradores. En función de la potencia que debemos entregar, se reparte la carga a los elementos de la red y establece un punto de funcionamiento para cada aerogenerador haciendo que la frecuencia final coincida. Las rectas de reparto de carga tienen una forma similar a las que se muestran en la figura 4.



FIGURA 4 CONTROL CON DROOPS

1.2 Objetivo

Con el fin de poder realizar experimentos sobre el comportamiento de una microrred, se propone desarrollar un banco de pruebas que permita la simulación de un parque eólico. Las estrategias de control de los inversores así como de los diferentes equipos del sistema podrán ser probadas en el banco, aportando información para la determinación sobre qué controles son empíricamente más adecuados. El banco se

compondrá inicialmente de dos inversores, una carga, una fuente de tensión para los inversores y los elementos de control y medida. Se ha decidido que esta configuración simplificada puede ser beneficiosa con el fin de facilitar etapas de pruebas iniciales, el esquema se representa en la figura 5. Se prevé la ampliación del banco añadiendo más inversores e incluso cambiar la carga por otro inversor, simulando el convertidor de la conexión HVDC. Con esta ampliación los resultados obtenidos podrán ser de mayor similitud con respecto a un parque eólico real.

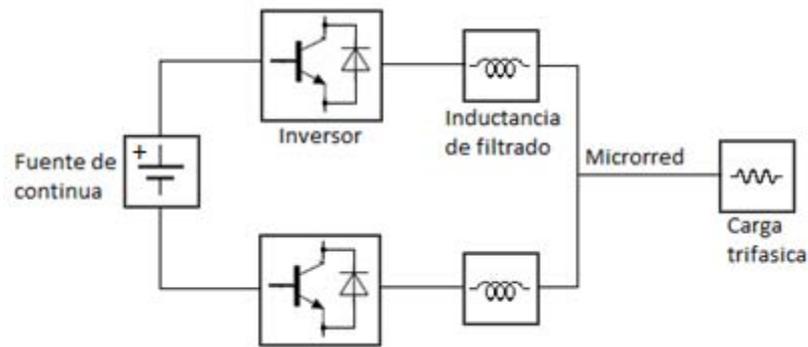


FIGURA 5 ESQUEMA BANCO DE PRUEBAS

1.3 Justificación

La tecnología eólica es una de las más económicas dentro de la generación renovable, llegando a competir en rentabilidad con los sistemas de generación más tradicionales. Esta tecnología permite la generación de energía evitando la emisión de grandes cantidades de CO_2 , sin la necesidad de gastar combustibles fósiles que, al contrario que el recurso eólico son limitados. El ahorro que se obtiene en contaminantes con respecto a una central térmica de carbón es de aproximadamente:

- 0,6 kg de CO_2 por kWh.
- 1,33 gr de SO_2 por kWh.
- 1,67 gr de NO_x por kWh.

Adicionalmente, se eliminan al emplear esta tecnología, los peligros inherentes al uso de los combustibles fósiles. Los desastres con petroleros o los peligros de transporte de material radioactivo son ejemplos de situaciones de peligro eliminadas.

Con los datos de contaminación expuestos anteriormente, y estimando las horas equivalentes anuales del parque en 4746 h, se puede afirmar que un parque eólico de 10 MW ahorra un total de 28.480 Tn de CO_2 . Se debe tener en cuenta que es aproximadamente la energía que consumen unas 11000 familias durante un año.

Como se ha indicado anteriormente, prácticamente la totalidad de los espacios viables para la instalación de generadores eólicos han sido ya aprovechados. Si se desea

aumentar la generación eólica se contemplan dos opciones. La primera de las opciones es incrementar el rendimiento de los generadores, no es una tarea que resulte sencilla ya que las maquinas eléctricas están a día de hoy muy desarrolladas. Además siempre está presente el límite de Betz, que indica que no se puede extraer más de un 40% de la energía contenida en el viento. En segundo lugar se puede optar por encontrar nuevos emplazamientos, como es el caso de los parques eólicos offshore. Las ventajas de la implantación de estos parques en estos nuevos emplazamientos son suficientes para incentivar su aparición, pese a la adversidad del entorno.

1.4 Tecnología de los parques eólicos offshore

1.4.1 Maquinas eléctricas de los aerogeneradores

Se pueden encontrar básicamente tres tipos de máquinas eléctricas habitualmente, los primeros que se utilizaban, eran los generadores asíncronos conectados directamente a red. El esquema corresponde a la figura 6. Este sistema conocido como concepto danés, es una solución robusta, simple, económica y con bajos costes de mantenimiento. El principal inconveniente es que la velocidad es fija y es necesario un mecanismo multiplicador de la velocidad debido a la gran diferencia existente entre la velocidad del generador y la velocidad de la turbina eólica. Además requiere de energía reactiva para su magnetización. Se suelen conectar bancos de condensadores cercanos para compensar esta energía.

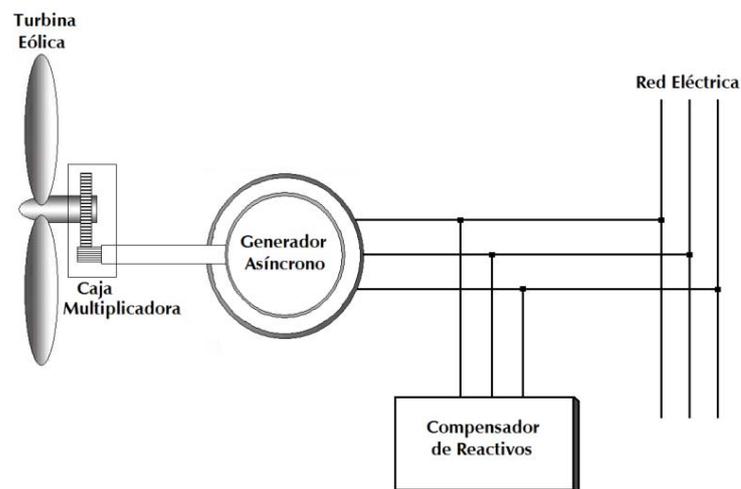


FIGURA 6 GENERADOR ASÍNCRONO CONECTADO DIRECTAMENTE A RED

Modelos posteriores de aerogeneradores ya se aprovecharon de una tecnología que permite un control mayor, los generadores asíncronos doblemente alimentados o GADA.

Este tipo de generador también se encuentra directamente conectado a red, pero dispone de un convertidor electrónico back to back que controla las corrientes del rotor, este control de las corrientes del rotor permite trabajar a velocidades variables, ya que permite que el rotor y el estator se encuentren sincronizados pese a que la velocidad mecánica del rotor sea diferente. La ubicación del convertidor se representa en la figura 7. Además los GADA también son capaces de generar y consumir energía reactiva contribuyendo de esta forma a la red general. El diseño del convertidor debe contemplar un tercio de las corrientes del estator aproximadamente. Las características que definen esta tecnología de aerogenerador han motivado su utilización, llegando a situarse actualmente como la tecnología predominante en el ámbito de la generación eólica.

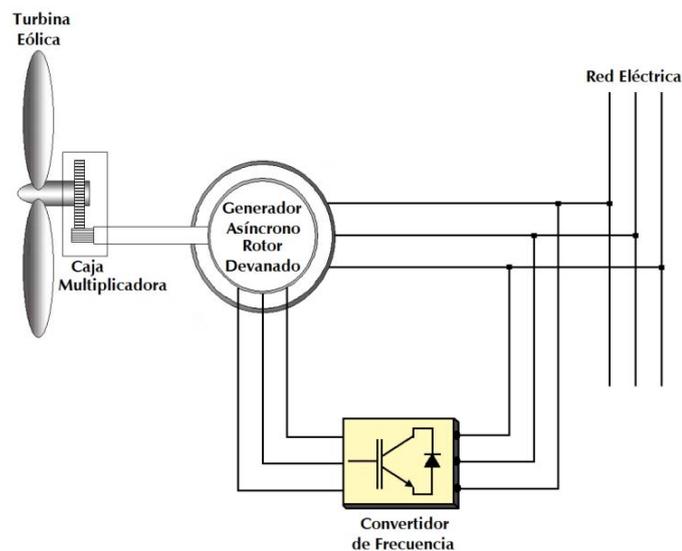


FIGURA 7 GENERADOR GADA

Los modelos más modernos de aerogenerador incorporan generadores síncronos con imanes permanentes. Este tipo de tecnología emplea acompañada de un convertidor electrónico de frecuencia que controla la totalidad de las corrientes, por lo que la velocidad de giro es totalmente variable. La conexión del mismo a la red se realiza tras el convertidor, esta conexión se observa en la figura 8. Se puede llegar a suprimir la caja multiplicadora de velocidad, esto supone un gran adelanto para el mantenimiento ya que ocasiona muchos problemas al contener aceite para su refrigeración. Otra característica muy deseable es que al tener el control total de las corrientes, son los que mejor comportamiento con la red tienen. El principal inconveniente es el precio del neodimio, el material con el que se fabrican los imanes. También hay que considerar que el convertidor se diseña para el total

de la corriente por lo que es un coste adicional considerable. El número de instalaciones con este tipo de generador va en aumento.

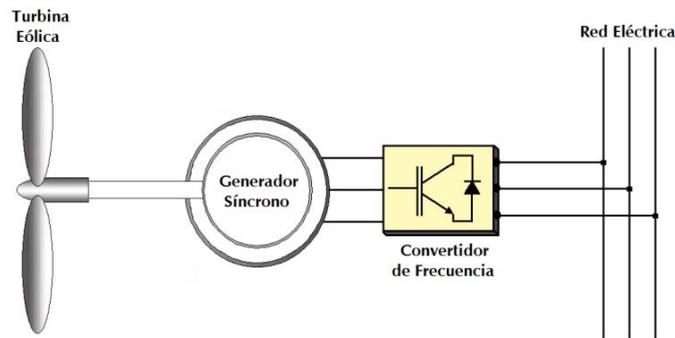


FIGURA 8 PMSG

1.4.2 Características técnicas de los parques eólicos offshore

1.4.2.1 Tensión

Actualmente en los parques eólicos instalados en tierra es habitual encontrar tensiones de alterna de 20-36 kV, este es habitualmente el nivel de tensión de la red de distribución interna del parque. La red de transmisión suele tener niveles superiores, sobre 220-132kV, la conexión se efectúa mediante una subestación eléctrica que recoge la energía de todo el parque. La tensión de generación de las máquinas eléctricas suele ser de 690 V, este valor es elevado por un transformador que suele encontrarse en la base del aerogenerador.

El hecho de encontrarse el parque en el medio marino añade condiciones especiales en su distribución. Afecta al valor de tensión aconsejable la distancia de los componentes:

- La distancia entre aerogeneradores, tiende a incrementarse en los parques offshore debido a que se incrementa el efecto estela en el viento entre ellos.
- La distancia del punto de conexión con la red general, aumenta al hallarse el parque en el mar.

Al aumentar estas distancias las pérdidas en los conductores son incrementadas proporcionalmente disminuyendo el rendimiento del parque. Aumentar la tensión es la forma de reducir estas pérdidas, por contra los costes se incrementan ya que tanto los transformadores como la subestación tienen a aumentar de igual forma.

En general los parques eólicos instalados en estos momentos, suelen emplear redes de alterna interna con un valor de tensión de 36kV, pero los parques eólicos de menor

tamaño no ven recompensado el incremento del coste por utilizar esta tensión por lo que pueden emplear niveles menores.

1.4.2.2 Cableado

La conexión de los parques eólicos offshore con la red de distribución se realiza con un cableado submarino, generalmente enterrado en el fondo del mar de 1 a 4 metros para reducir el riesgo de daños. Se deben tener en cuenta estos esfuerzos adicionales además de los parámetros habituales en el diseño, como son: el aislamiento eléctrico, que es función del espesor del aislante y la sección del conductor, que aumentara cuanto más corriente se necesite evacuar. La evacuación del calor del conductor en el terreno enterrado en el fondo del mar es otro factor que afectará al diseño del cableado, ya que puede ser otro limitador de la corriente que puede transportar el cable.

1.4.3 Tecnologías para el enlace a la red general

La distancia del parque eólico marino con respecto a la red terrestre y el medio donde se encuentra el parque generan la necesidad de realizar un estudio sobre el medio de transmisión más adecuado para transportar la energía. Existen dos opciones, los enlaces de alta tensión de corriente continua (HVDC) y los de corriente alterna (HVAC).

Un enlace de corriente alterna supone un ahorro en los costes de la instalación ya que no requiere un convertidor electrónico y las consecuentes pérdidas de transmisión que genera. Se debe tener en cuenta el aumento de la capacitancia que se da por las condiciones de instalación del conductor. Esta capacitancia creara corrientes de energía reactiva que incluso pueden acabar saturando el conductor. La conducción de las corrientes reactivas causa pérdidas del mismo modo que las corrientes activas, debido al efecto resistivo de los conductores. Si las corrientes son muy grandes pueden incluso llegar a dejar el parque sin capacidad de evacuación de energía. Por último se debe tener en cuenta que no existe un desacoplamiento de redes entre la red offshore y la red terrestre, es decir si existe alguna perturbación en la red terrestre esta será repercutida a los aerogeneradores, los cuales deberán estar preparados para esta eventualidad.

El enlace de corriente continua es una opción que añade gran capacidad de control en el parque, la transmisión de potencia está totalmente controlada y las redes de tierra y offshore se encuentran desacopladas. Al ser corriente continua el efecto de la capacitancia del conductor desaparece por lo que las pérdidas en conducción disminuyen considerablemente al reducir la corriente total. Esto permite realizar conexiones de mayor distancia al tener menores pérdidas de conducción pero por contra aparecen nuevas pérdidas debidas al convertidor electrónico.

Existen dentro de los enlaces de continua dos tecnologías, los enlaces de continua de alta tensión con convertidores conmutados por línea (LCC-HVDC) y los enlaces de

continua de alta tensión con convertidores por fuente de tensión (VSC-HVDC), se diferencian en el tipo de convertidor que emplean cada una de ellas.

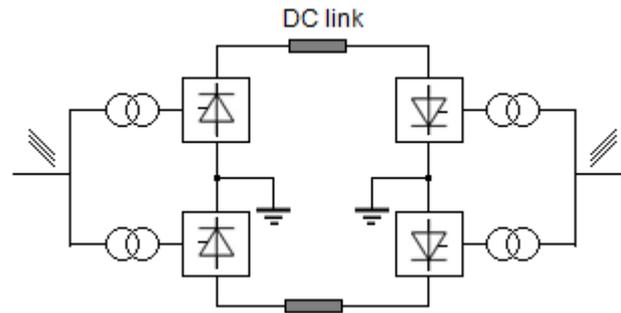


FIGURA 9 ENLACE LCC-HVDC

Los primeros que se emplearon fueron los conmutados por línea, este tipo de convertidor permite instalaciones de mayor potencia, debido a que los componentes soportan corrientes mayores. Requieren para poder operar una red alterna, por lo que en la red offshore se deben instalar sistemas auxiliares que inicien la red. Las fuentes auxiliares podrán estar comprendidas por generadores diésel y compensadores estáticos síncronos STATCOM. Se aprovechan estos elementos de la misma forma en los momentos de poco viento para mantener la red. El inversor y el rectificador formado por tiristores consumen gran cantidad de energía reactiva por lo que necesitará de unos condensadores para compensarla. Además es necesario el uso de un filtro ya que generan armónicos de bajo orden. Una característica muy favorable de esta tecnología es que tiene una alta fiabilidad llegando a tener una disponibilidad superior al 98,5%. En la figura 9 se encuentra un esquema de la composición de estos enlaces.

Los enlaces con convertidores de fuente de tensión se aprovechan de la tecnología más avanzada en electrónica de potencia, como son los IGBT y los GTO, transistor bipolar de puerta aislada y tiristor de apagado por puerta respectivamente. Estos elementos introducen la posibilidad de trabajar con técnicas de modulación por ancho de pulso. Esta solución mejora la estabilidad y el control de la energía activa y reactiva, se puede controlar la energía activa y reactiva en ambos extremos del enlace. Este tipo de elementos no requieren de una red alterna para poder conmutar, y al hacerlo a frecuencias muy superiores a los conmutados por línea, generan armónicos de orden superior que se pueden filtrar más fácilmente. La figura 10 muestra la configuración del enlace HVDC-VSC

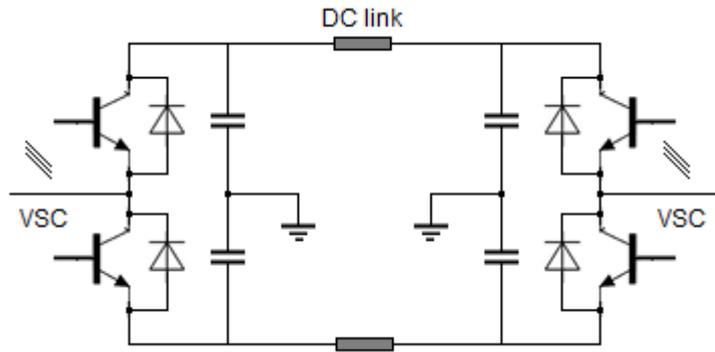


FIGURA 10 ENLACE VSC-HVDC

Para poder establecer qué tipo de tecnología es más apropiada para cada instalación en la figura 11 se pueden observar las pérdidas en un enlace de corriente alterna y uno de corriente continua con la distancia. La distancia X suele encontrarse entre 25 y 50 km pero depende de la configuración de la línea, valores de tensión y tipo de cable.

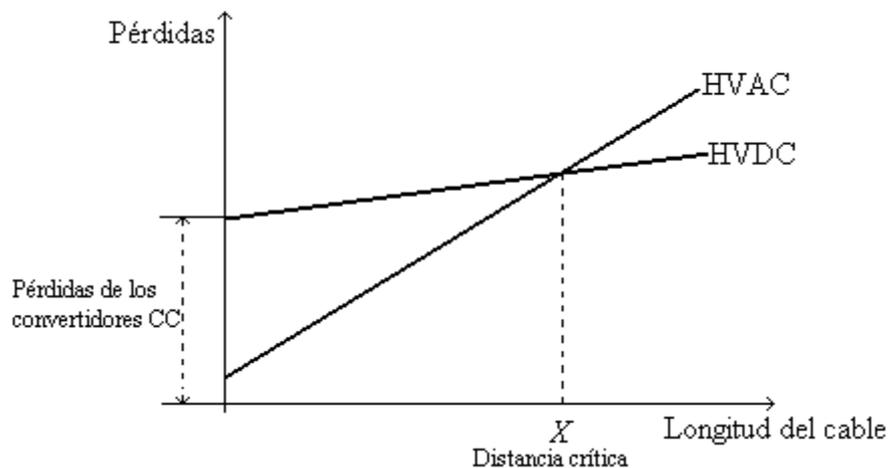


FIGURA 11 PERDIDAS DE ENERGÍA CON LA DISTANCIA

También se deben tener en cuenta en la selección del medio de transporte, el tamaño de las subestaciones offshore. En general una subestación del sistema HVAC ocupará un tercio de lo que ocupa la HVDC, ya que además del transformador deberá alojar: los condensadores, la electrónica de potencia, filtros, y los demás elementos de protección.

Finalmente en la figura 12 se muestran las configuraciones típicamente seleccionadas en función de la potencia del parque y la distancia.

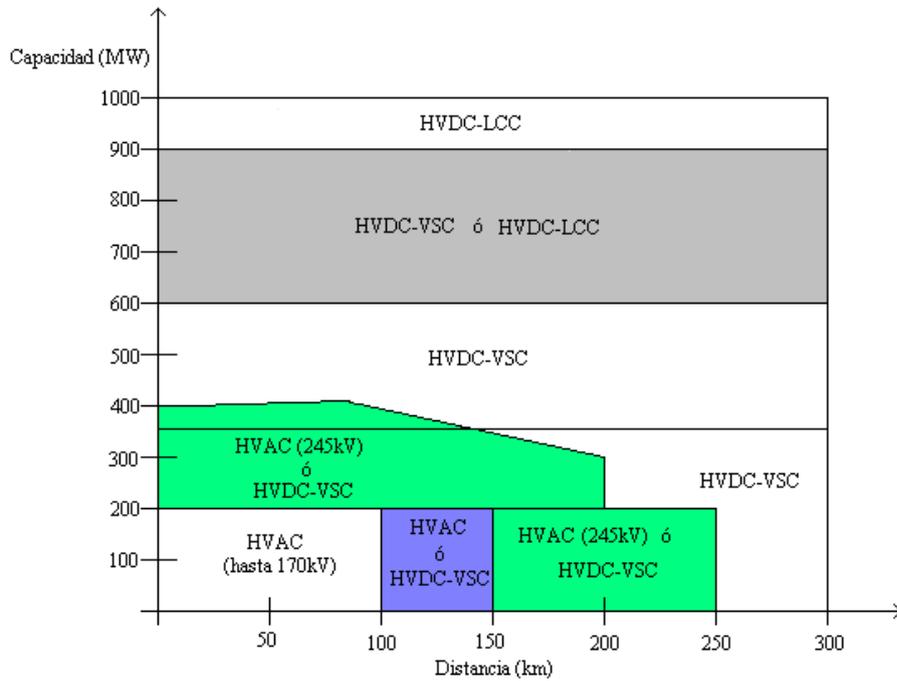


FIGURA 12 TIPOS DE ENLACES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y POTENCIA

1.4.4 Configuraciones de los parques eólicos offshore

Las diferentes tecnologías de enlaces y de aerogeneradores se suelen combinar para dar lugar a configuraciones típicas de los parques eólicos, las más empleadas se exponen a continuación.

- Generadores asíncronos con convertidor electrónico y enlace de alterna

Este tipo de configuración solo es factible cuando las distancias son limitadas, ya que el enlace de alterna tiene grandes pérdidas al aumentar las distancias

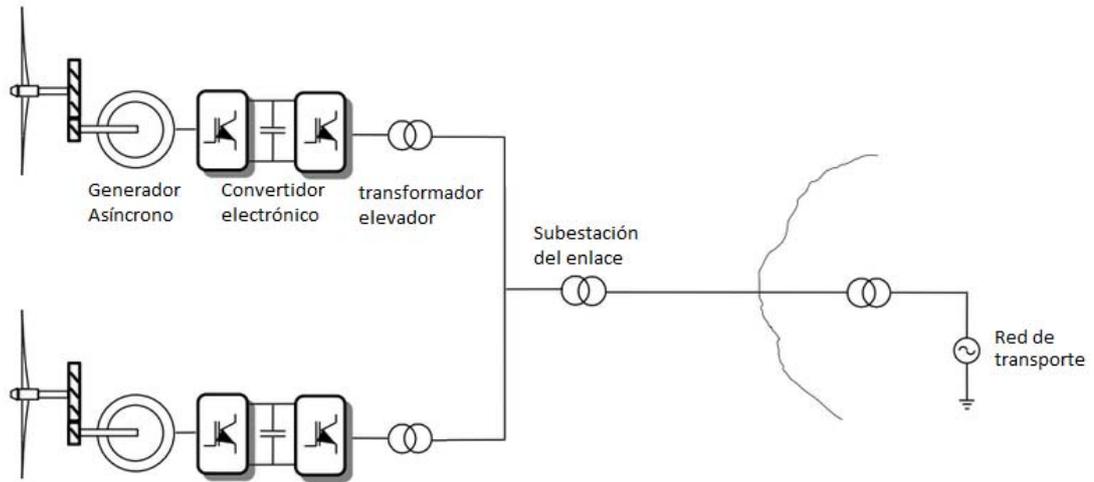


FIGURA 13 SCIG + CONVERTIDOR+ HVAC

El generador asíncrono podrá funcionar a una velocidad variable para aprovechar toda la energía posible, por lo que la frecuencia de las tensiones y corrientes son de igual forma variables. Debido a esto se añade un convertidor AC/AC que se sincronizará a la red del enlace, la cual está conectada al mismo tiempo a la general. Se trata de la configuración más simple, pero al estar limitada por la distancia, está viendo reducido su interés. La figura 13 muestra el esquema del parque.

- Aerogeneradores GADA con enlaces LCC-HVDC

Al resultar los aerogeneradores GADA tan exitosos en los parques terrestres, ha sido de interés instalarlos también en los parques offshore. Con el fin de aumentar la distancia del enlace se ha empleado una línea de conexión de corriente continua. El hecho de escoger la tecnología LCC es debido a que es la más empleada tradicionalmente, tiene menores pérdidas y puede transportar energías mayores.

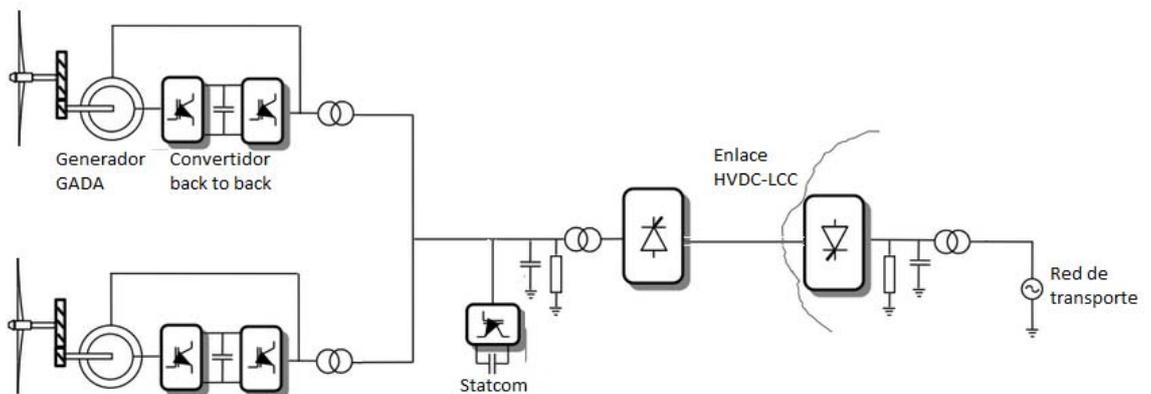


FIGURA 14 AEROGENERADORES GADA+ ENLACE LCC-HVDC

Como se puede observar en la figura 14, el sistema cuenta con un STATCOM para asegurar la red de alterna offshore, ya que sin ella no podría extraer energía el enlace. El inversor del enlace en la red terrestre controla la tensión del enlace HVDC, mientras que el rectificador contiene un control de corriente, tratando de maximizar la energía extraída de los aerogeneradores.

- Aerogeneradores GADA con enlace VSC-HVDD

La figura 15 contiene el esquema de este tipo de parque, que como se puede ver es similar al anterior excepto por el convertidor.

De la misma forma que con el enlace LCC se ha investigado el empleo de la conexión VSC. Al igual que en el anterior caso el inversor de red mantiene el valor de tensión del enlace de continua, puede al mismo tiempo controlar la energía reactiva que vuelca a la red. El rectificador tratará de inyectar al enlace toda la energía generada por los GADA, simultáneamente creará la red offshore AC manteniendo la tensión y la frecuencia en los valores de referencia. Para lograr esto la estrategia es emular una fuente de tensión infinita con valores de tensión y frecuencia constantes, debe a su vez generar la potencia reactiva necesaria para los transformadores.

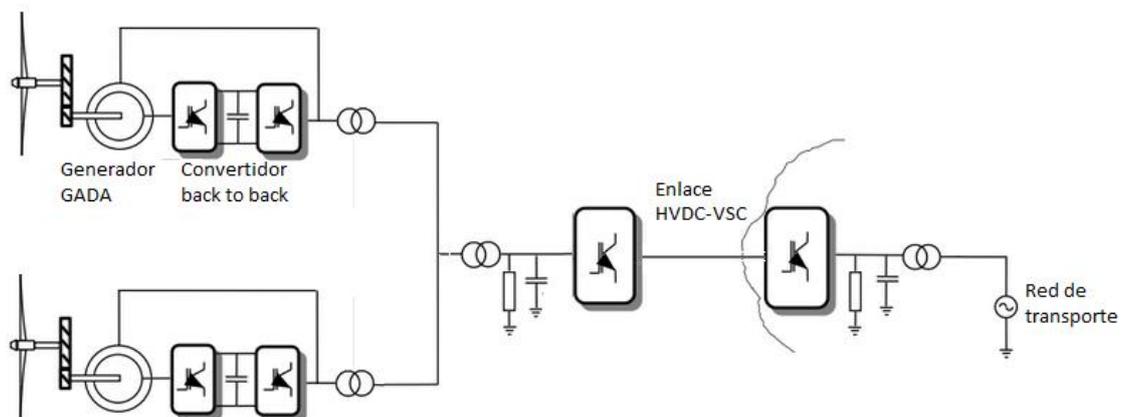


FIGURA 15 AEROGENERADORES GADA + VSC-HVDC

- Generadores síncronos de imanes permanentes con diodo rectificador y LCC-HVDC

Debido a que la transmisión de energía es unidireccional se puede cambiar el rectificador controlado por un puente de diodos, con esta solución además de reducir las pérdidas se simplifica el control.

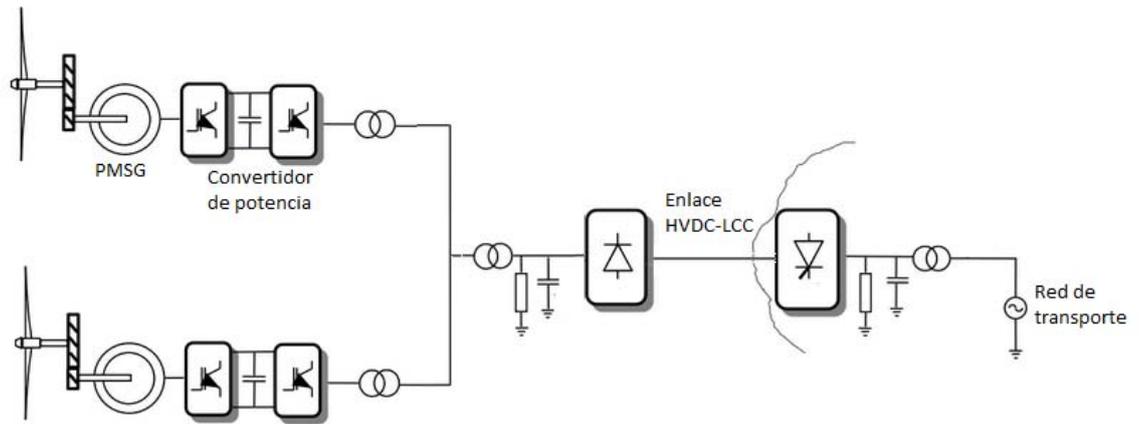


FIGURA 16 ESQUEMA CON PMSG Y LCC-HVDC

El convertidor del enlace de continua actúa controlando la tensión del enlace de continua tratando de mantenerla estable. Al no disponer del control del rectificador, ya que es un rectificador de diodos como se observa en la figura 16, deben ser los inversores de la red offshore los encargados de controlar tanto la tensión, la frecuencia como de las corrientes de la red offshore. Para lograr este doble control se necesita un lazo de control externo que fija la potencia activa y reactiva, además de un segundo lazo que, recibiendo las corrientes como referencia, genera las tensiones para los inversores.

- Generador síncrono de imanes permanentes con enlace VSC-HVDC

El último esquema propuesto cuenta con un enlace con tecnología de fuente de tensión, este sistema, que se puede ver en la figura 17, es el que emplea la tecnología de vanguardia.

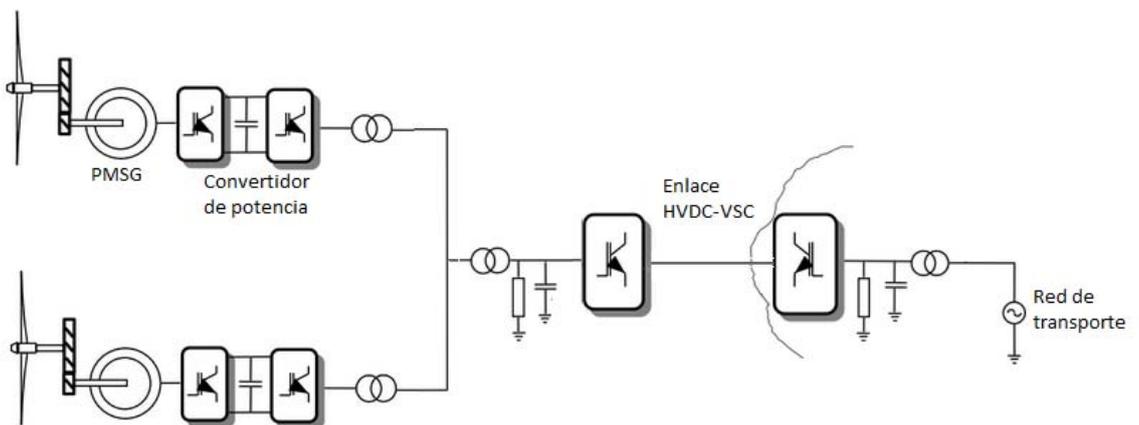


FIGURA 17 PMSG, ENLACE VSC-HVDC

En este caso el inversor de conexión a la red terrestre también se encarga de controlar la tensión del enlace de continua, esto lo puede realizar controlando la corriente activa inyectada a la red. Simultáneamente puede controlar la corriente reactiva y por tanto la energía reactiva. El rectificador de la estación offshore tratará de evacuar toda la potencia

generada y los inversores de los aerogeneradores se centrarán en mantener la frecuencia y la tensión constantes en la red offshore.

1.5 Planteamiento y análisis de las alternativas de control de una red aislada offshore

Se consideran como variables a controlar de la microrred de un parque eólico formado por generadores PMSG con enlace VCS-HVDC, las potencias activa y reactiva entregadas por el parque, la tensión y la frecuencia de la red offshore, y la tensión del enlace de continua. Como el sistema está compuesto por varios elementos que pueden ejercer control, es decir los inversores de la red offshore y el convertidor del enlace de continua, se pueden proponer diferentes estrategias. El esquema del parque está definido en la figura 18.

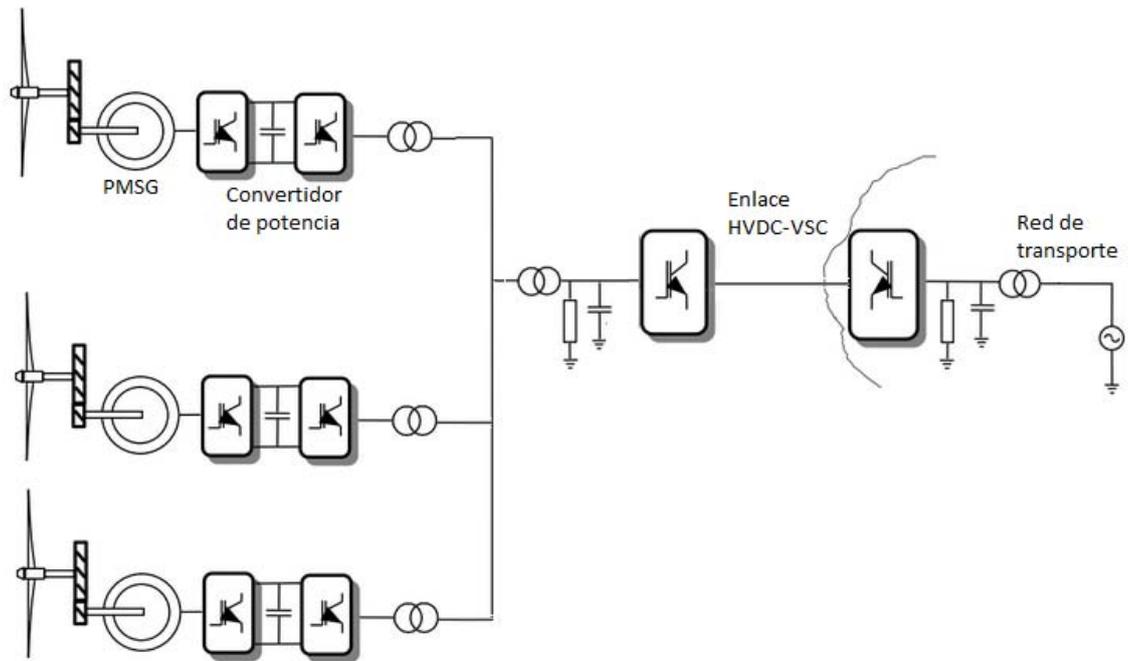


FIGURA 18 MODELO DE PARQUE EÓLICO CONSIDERADO

- Estrategia 1 : El rectificador del enlace de continua es el responsable del control de la tensión y la frecuencia de la red aislada, los flujos de potencias activa y reactiva son controladas por los inversores de los aerogeneradores
- Estrategia 2: Los inversores de los aerogeneradores son los que realizan el control tensión- frecuencia, el convertidor de la conexión de continua se encarga de controlar el flujo de potencias.

1.5.1 Control Estrategia 1.

La primera estrategia se descompone en tres controles, en primer lugar el control de la tensión del enlace por parte del inversor de la red terrestre. Como se puede ver en la figura 19 se establecen dos corrientes de referencia que tras el controlador generarán las tensiones síncronas a la red. Las referencias de las corrientes se ajustan para con la corriente reactiva controlar la potencia reactiva entregada a la red y con la corriente activa controlar la tensión del enlace.

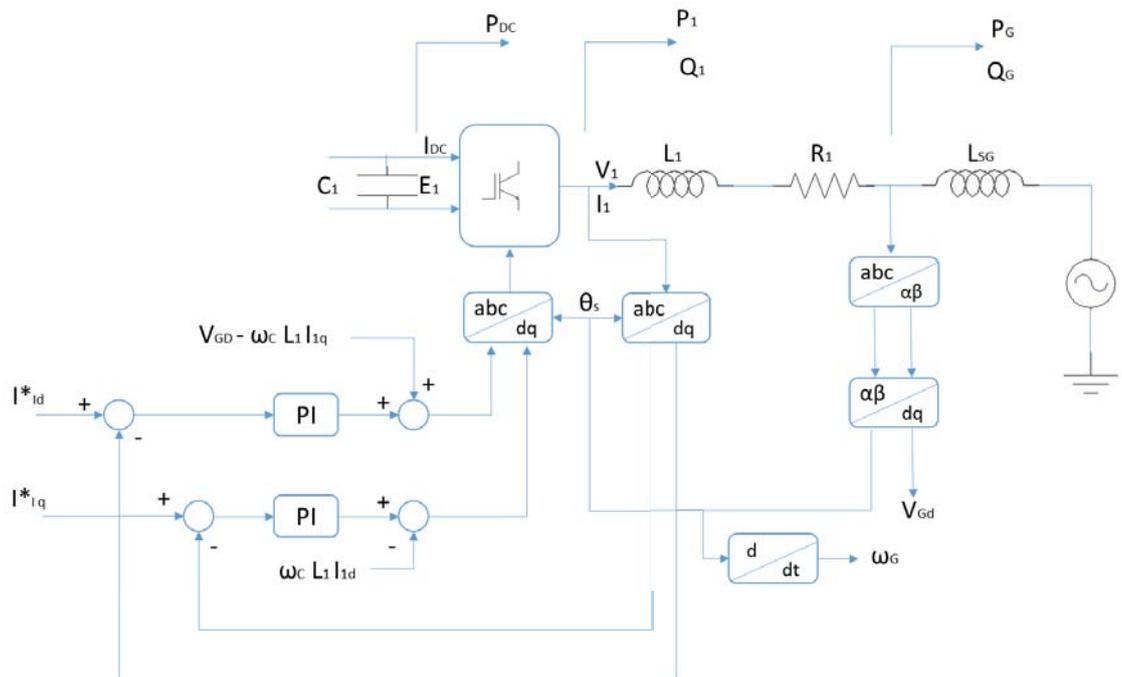


FIGURA 19 CONTROL TENSIÓN ENLACE

En la figura 20 se muestra el control de la tensión del enlace mediante la corriente activa del inversor. Este control se basa en que si la potencia que entra en el enlace es la misma que la que sale la tensión se mantiene estable, existe de esta forma la relación de la ecuación 1.

$$\Delta u_{EI} = \Delta P_{Idc} - 3V_{vd0}\Delta I_{Gd}^* \quad (1)$$

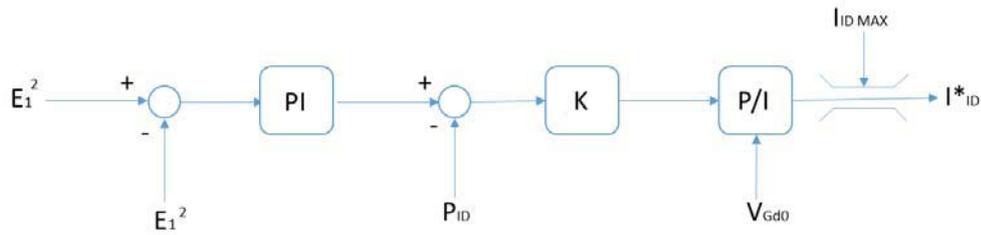


FIGURA 20 CONTROL DE LA TENSION DEL ENLACE, CAMBIO DE REFERENCIA

Para controlar la potencia reactiva, por medio de la corriente reactiva se puede emplear el diagrama de la figura 21, conocidas las tensiones se calcula la corriente reactiva que debemos emplear de referencia.

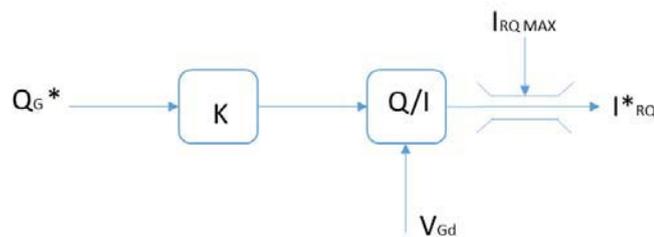


FIGURA 21 CONTROL DE LA POTENCIA REACTIVA

El segundo control del que se compone esta estrategia incluye emplear el convertidor de la estación offshore para generar la red y servir de referencia. La figura 22 muestra esta parte del control.

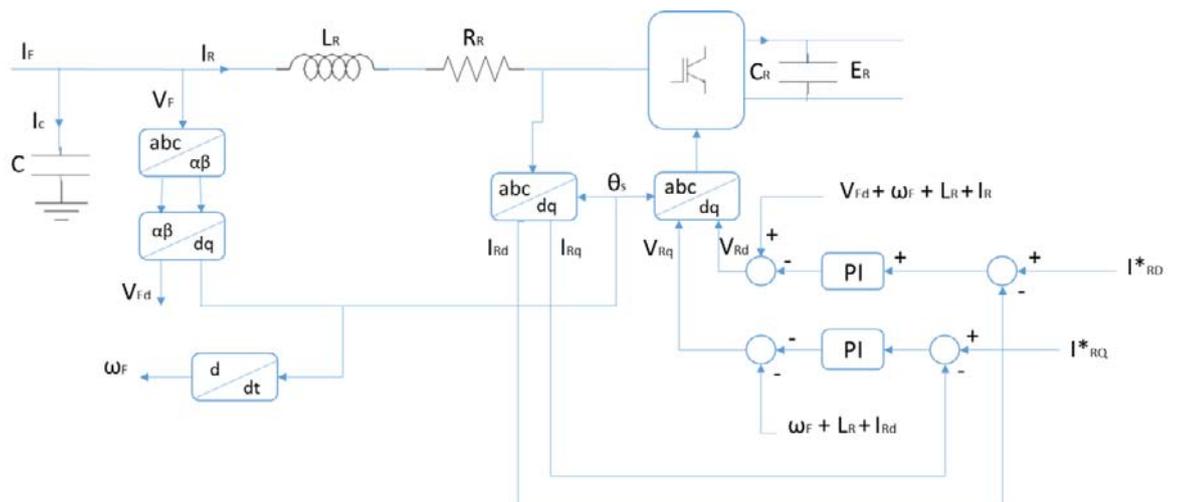


FIGURA 22 CONTROL RED OFFSHORE

Como en el caso anterior se pueden ajustar corrientes de referencia que luego se cambian a tensiones para el inversor, en este caso las corrientes son sincronizadas con los

vectores d-q , la coordenada d afecta a la tensión del enlace y la coordenada q a la frecuencia. El sistema de cambio de referencia se encuentra en la figura 23.

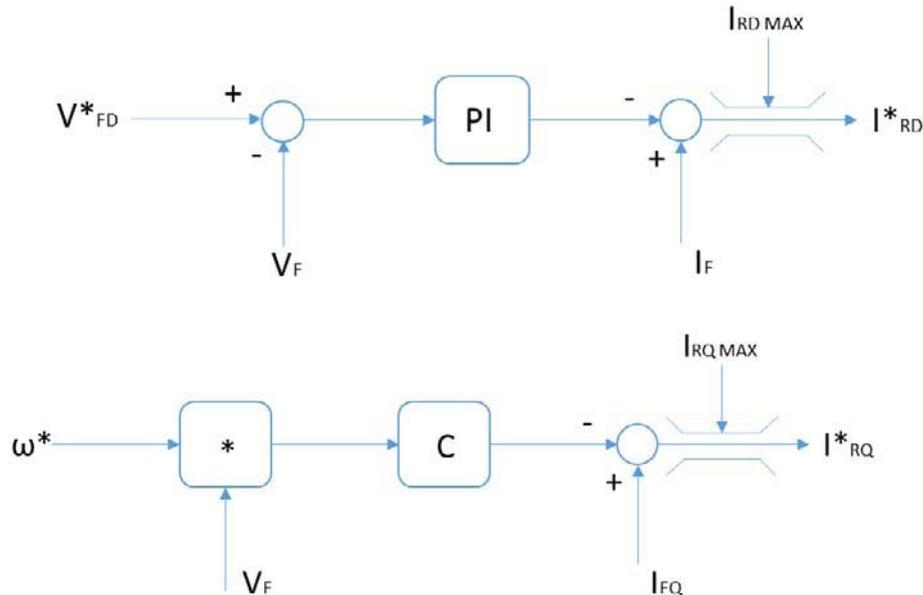


FIGURA 23 REFERENCIAS PARA EL CONTROL DE LA RED OFFSHORE

Este control se basa en las ecuaciones de la dinámica de la tensión del condensador de la red offshore. Las ecuaciones 2 y 3 recojen el comportamiento del condensador.

$$\frac{d}{dt} V_{Fd} = \frac{1}{C_F} I_{Cd} = \frac{1}{C_F} (I_{Fd} - I_{Rd}) \quad (2)$$

$$\omega_F V_{Fd} = \frac{1}{C_F} I_{Cq} = \frac{1}{C_F} (I_{Fq} - I_{Rq}) \quad (3)$$

Finalmente los inversores de la red marina han de evacuar toda la energía posible, siguiendo las curvas de eficiencia de los aerogeneradores en función de la velocidad del viento, es decir un control como el de la figura 19 puede ser adecuado. Se fijará la corriente activa en función de la velocidad del viento de forma que sea la más eficiente, y la corriente reactiva será la necesaria para los transformadores.

1.5.2 Control Estrategia 2

La segunda estrategia que se puede adoptar, consiste en hacer responsables de la red offshore a todos los inversores de los aerogeneradores. El rectificador controlado del enlace HVDC ajustará el valor de tensión del enlace, por último el inversor del enlace controlará la potencia activa y reactiva inyectada a la red.

La red offshore se puede considerar una microrred alimentada por los inversores de los aerogeneradores, debido a la carga inductiva se puede implementar el control por droops donde la frecuencia sea función de la potencia activa entregada y la tensión de la potencia reactiva, Para que los inversores compartan la carga proporcionalmente se

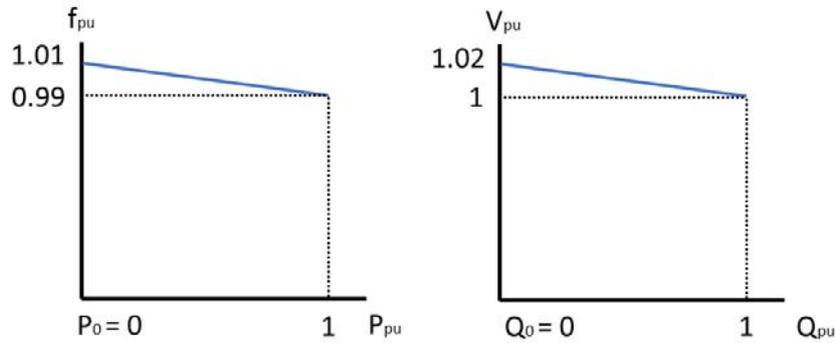


FIGURA 24 CONTROL CON DROOPS

establecen las curvas de droop de la figura 24, al dar los valores en Pu si se escoge el valor de base el valor nominal , todos los generadores trabajaran con la misma carga, en el caso de un parque eólico esto puede no interesar ya que la potencia disponible en cada momento depende del viento , debido a esto se puede fijar como valor de base la potencia disponible en ese momento por cada aerogenerador de esta forma acabarán funcionando todos los aerogeneradores en el mismo punto.

Se designan las ecuaciones 5 y 6 para realizar este control que describen las curvas de droop, se permite una variación de un 2% en la frecuencia y en la tensión como máximo.

$$f = f_0 + m (P - P_0) = 1.01 - 0.02(P - 0) \quad (5)$$

$$V = V_0 + n(Q - Q_0) = 1.02 - 0.02(Q - 0) \quad (6)$$

Con el fin de prevenir las continuas oscilaciones de la frecuencia, se añade un control secundario de la figura 25, este modifica el valor P_0 modificando para ello la corriente.

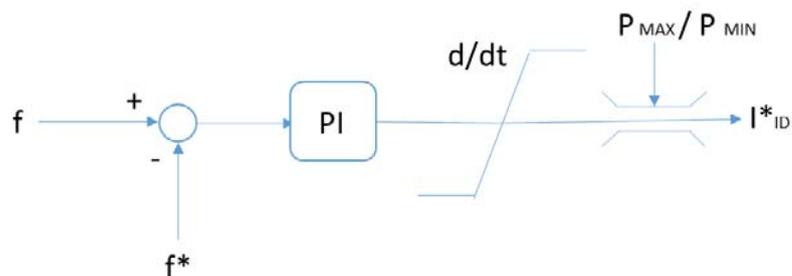


FIGURA 25 REFERENCIA DE FRECUENCIA

La tensión del enlace de continua es controlada por convertidor del enlace, inyectando más corriente activa cuando disminuye la tensión y dejando de inyectar si aumenta, el diagrama de bloques puede ser equivalente al de la figura 19 añadiendo la referencia de tensión de la figura 20. Además se puede controlar la potencia reactiva con el fin de alimentar los transformadores.

El convertidor de la central terrestre controla la potencia activa y reactiva entregada a la red en todo momento. Como en el caso anterior el control mediante el lazo de las corrientes puede ser una buena solución. En caso de fallo de la red, el inversor puede ayudar a su recuperación.

1.5.3 Control de un inversor

El objetivo del inversor es lograr una forma de onda estable frente a perturbaciones en la entrada y en la carga, para lograr esto existen diferentes técnicas de modulación. Se propone en este caso la modulación SVPWM conocida como modulación vectorial. Esta modulación permite trabajar con un único vector de tensión sustituyendo el sistema trifásico.

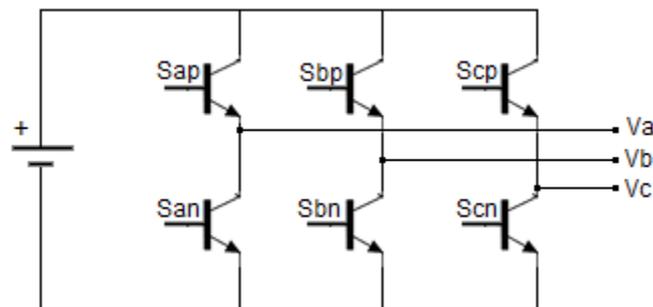


FIGURA 26 ESQUEMA DE UN INVERSOR TRIFÁSICO

Para comprender la implementación de esta modulación debemos observar en primer lugar las posibilidades de conmutación y las tensiones que se generan en la salida debido a estas, la figura 26 puede ayudar en este respecto. Existen dos reglas para la conmutación básicas, nunca se debe cortocircuitar la fuente de continua, es decir nunca deben conducir los dos IGBTs de una rama al mismo tiempo, además las bobinas de la salida nunca deben estar en circuito abierto, debido a esto siempre debe haber alguno de los IGBTs de cada rama en conducción. La tabla de la figura 27 muestra las tensiones que se generan entre las fases y también referenciadas al sistema de coordenadas alfa beta.

	000	100	110	010	011	001	101	111
V_{ab}	0	V_{dc}	0	$-V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	V_{DC}	0
V_{bc}	0	0	V_{DC}	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$-V_{DC}$	0
V_{ca}	0	$-V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	V_{DC}	V_{DC}	0	0
v_{α}	0	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	V_{DC}	0
v_{β}	0	$\frac{\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	$\frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	$\frac{\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	$-\frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}V_{DC}}{3}$	0
v_0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURA 27 TENSIONES DE SALIDA EL INVERSOR

Con estas conmutaciones básicas se pueden generar 6 vectores de tensión y dos vectores nulos. Para poder generar todo el sistema trifásico se deben completar las posiciones adyacentes a estos vectores, para generar un vector intermedio se debe conmutar entre los vectores adyacentes y el vector nulo. El tiempo de conmutación de los vectores será función de la distancia del vector a generar con los vectores de referencia. En la figura 28 encontramos los diferentes valores de los vectores de conmutación básicos, así como los planos que generan estos vectores. Cada plano indicará que los vectores entre los que se deben conmutar, estos son los que lo delimitan y además el vector nulo, el vector nulo permite cambiar el valor de amplitud de la tensión ya que si se conmuta un vector nulo disminuye la media de la tensión.

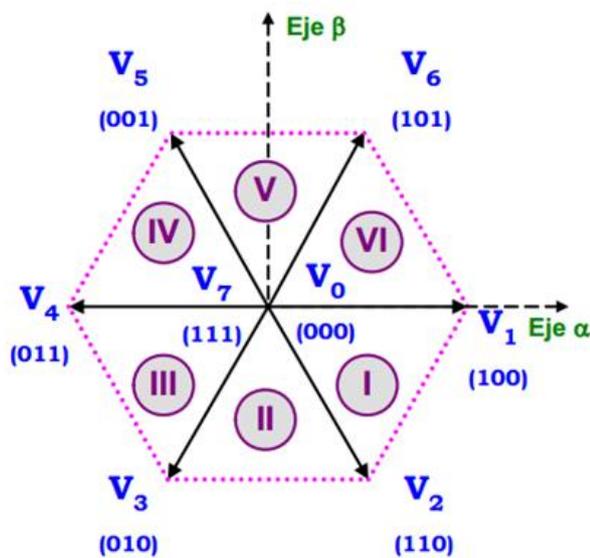
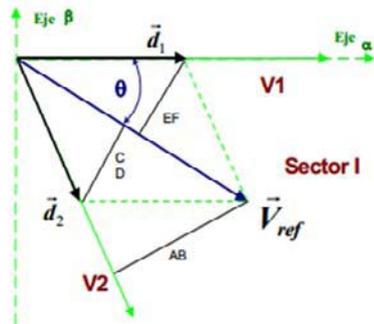


FIGURA 28 VECTORES DE CONMUTACIÓN BÁSICOS

A continuación en la figura 29 se indica con más detalle la forma de calcular los tiempos de conmutación para cada uno de los vectores, dado un vector situado en un plano cualquiera una distancia con respecto a los vectores dada.



$$T_m = \frac{T_s}{V_{DC}} \left[|\vec{V}_\alpha| \operatorname{sen} \frac{m\pi}{3} - |\vec{V}_\beta| \cos \frac{m\pi}{3} \right]$$

$$T_{m+1} = \frac{T_s}{V_{DC}} \left[|\vec{V}_\beta| \cos \frac{(m-1)\pi}{3} - |\vec{V}_\alpha| \operatorname{sen} \frac{(m-1)\pi}{3} \right]$$

$$T_{mlo} = T_{V0} + T_{V7} = T_s - T_m - T_{m+1}$$

FIGURA 29 DETALLE DE LOS TIEMPOS DE CONMUTACIÓN

1.6 Desarrollo del banco de pruebas

A continuación se detallan los elementos que componen el banco de pruebas actualmente, describiendo sus conexiones y algunas de sus características. Este apartado también contiene el circuito eléctrico del montaje actual además de la futura expansión del mismo.

1.6.1 Elementos del circuito de control

Algunos de los elementos de control presentes en el montaje han sido elaborados en un proyecto anterior, por lo que no se realizará una extensa exposición de su configuración interna pero sí una guía general para su empleo.

1.6.1.1 Equipo de medidas

Para realizar medidas de corrientes y tensiones se dispone del sistema de medidas de la figura 30, el cual dispone de tres medidas de tensión y tres medidas de corriente. Internamente está compuesto por tres transformadores de intensidad LA55P, tres tarjetas de medidas de tensión LEM LV 25-400, una placa de adaptación de niveles de tensión y una fuente de alimentación para todo el conjunto.

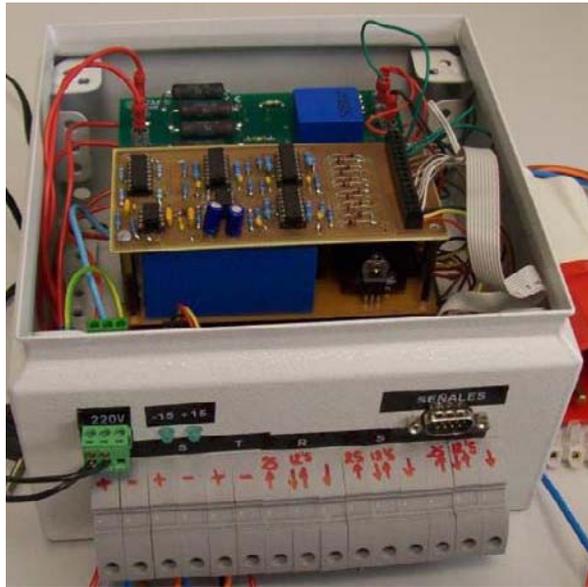


FIGURA 30 EQUIPO DE MEDIDAS

En la figura 31 se observa el borneo de conexiones para las medidas.

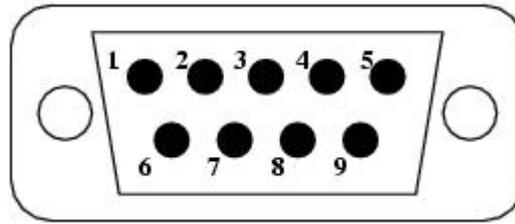
R		S		T		R			S			T		
+	-	+	-	+	-	25	12.5	↓	25	12.5	↓	25	12.5	↓
↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↑↓	↓	↑	↑↓	↓	↑	↑↓	↓
⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘

FIGURA 31 CONEXIONES EQUIPO DE MEDIDAS

Con el fin de aprovechar mejor el rango de medida, existen varias configuraciones posibles para la medida de corrientes, estas seleccionan el número de vueltas que el conductor da sobre el transformador de corriente.

Permite medir corrientes de hasta 25 amperios y tensiones de hasta 400 voltios.

El equipo dispone de un conector DB9 para las señales de salida, estas son proporcionales a las medidas pero con un rango de tensiones de 0-3 voltios que corresponde al rango de entrada del ADC del DSP. La figura 32 recoge las conexiones del conector.



1	V1	6	I3
2	V2	7	GND
3	V3	8	
4	I1	9	
5	I2		

FIGURA 32 CONECTOR DB9

Finalmente las señales de salida se llevan al DSP, el convertidor analógico digital de 12 bits, traduce una tensión de 0-3 voltios por un valor de 0 a 4096. Se debe asegurar que la salida nunca sobrepase los tres voltios que aceptan los convertidores analógicos digitales.

1.6.1.2 Tarjeta de disparos

Los disparos de los IGBT requieren de una corriente que no es capaz de soportar el DSP, debido a esto existe un circuito de interconexión que además de aumentar los niveles de tensión y poder suministrar la corriente necesaria, cuenta con un sistema de control de errores, los cuales indica por leds. Puede bloquear los disparos en caso de error hasta que se reinicia manualmente la memoria mediante un pulsador.

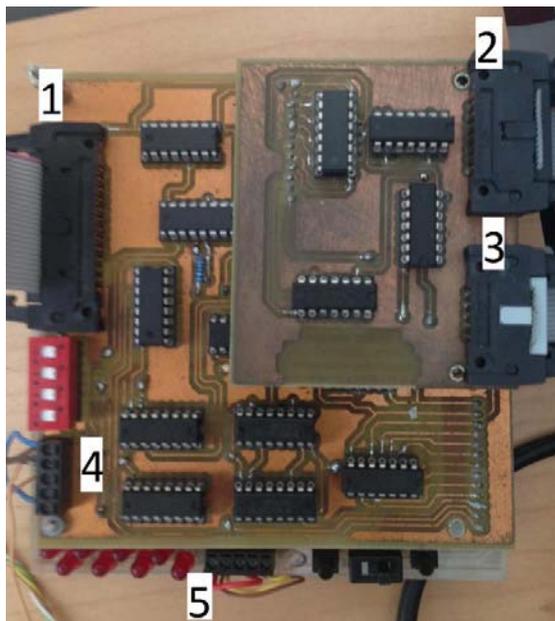


FIGURA 33 TARJETA DE DISPARO

El primer conector es el que recibe los disparos del DSP, también recibe otras señales como la conexión de resistencia de frenado o un error a nivel lógico, programable desde el DSP. El formato es un cable plano de 20 pines. Como ayuda para localizar los conectores se adjunta la figura 33.

Conector 1			
1	Referencia DSP		
2	PWM 1 fase A top		
3	PWM 1 fase A bottom		
4	PWM 1 fase B top		
5	PWM 1 fase B bottom		
6	PWM 1 fase C top		
7	PWM 1 fase C bottom		
8	PWM 2 fase A top		
9	PWM 2 fase A bottom		
10	PWM 2 fase B top		
11	PWM 2 fase B bottom		
12	PWM 2 fase C top		
13	PWM 2 fase C bottom		
14	Conexión resistencia frenado	Conector 4	
15	Conexión ventiladores	1	Alimentación 15V
16	Señal watchdog	2	GND
17	Señal error a 3V	3	Alimentación 3,3V
18	Señal error a 15v	4	Salida error general 15 V
19	Conexión-desconexión	5	Entrada error 15 V

TABLA 1 CONECTOR DE SEÑALES DEL DSP Y ALIMENTACIÓN

El conector numero 4 corresponde a la alimentación del conjunto, los errores actualmente no están siendo empleados por lo que están deshabilitados. La alimentación se realiza con una fuente de alimentación externa. Puede ser de interés el consumo del conjunto, este es de 15 vatios cuando se encuentra controlando dos inversores simultáneamente.

Conector 2		Conector 3	
1	Inversor 2 fase A top	1	Inversor 2 fase C top
2	Error inversor fase 1	2	Error inversor fase 1
3	Inversor 2 fase A bottom	3	Inversor 2 fase C bottom
4	GND	4	GND
5	Inversor 2 fase B top	5	Conexión resistencia frenado
6	Error inversor fase 2	6	Error resistencia frenado
7	Inversor 2 fase B bottom	7	Alimentación 15V
8	GND	8	Alimentación 15V
9	Alimentación 15V	9	GND
10	Alimentación 15V	10	GND
11	GND		
12	GND		

TABLA 2 CONECTORES DE DISPAROS A LOS INVERSORES

Los conectores 2 y 3 contienen las señales de disparo que adecua la placa. Son necesarias 6 señales de disparo para controlar un inversor. El inversor genera una serie de errores cuando detecta una sobre corriente, este conector también recoge estas señales para ser gestionadas por el sistema de detección de errores de la placa, estos conectores están duplicados, existen dos de cada uno de ellos para el control de dos inversores con una misma placa, estos se encuentran situados justo debajo de estos primeros.

Conector 5	
1	Alimentación a 15V
2	Referencia 0V
3	Entrada de error manual
4	Señal de reset
5	Parada manual por software

TABLA 3 CONECTOR SEÑALES DE ERROR

El último conector contiene señales de errores que actualmente no están siendo empleados pero pueden ser de utilidad en el montaje expandido previsto.

Los led de señalización de errores son muy útiles a la hora de encontrar donde se ha producido un error para poder solventarlo. La tabla 4 contiene la información sobre a cual corresponde cada uno.

Led	Error	Descripcion
1	ERROR 2	Error del watchdog
2	ERROR 3	Error desde DSP
3	ERROR 1	Error del inversor 1
4	ERROR 4	Error del inversor 2
5	ERROR 8	Error general desde X4:5
6	ERROR 7	Error de temperatura
7	ERROR 6	Error de sobrevoltaje
8	ERROR 5	Error manual

TABLA 4 SEÑALES DE ERRORES

1.6.1.3 Procesador digital de señal (DSP)

El núcleo del control del sistema se lleva a cabo por un DSP. Debido a su arquitectura es muy útil para realizar cálculos de forma más rápida que otros microcontroladores. En concreto el dispositivo escogido es una DSP de Texas Instruments TMS320 F2833, como el de la figura 35.



FIGURA 34 DELFINO F28335

Feature		F28335 (150 MHz)
Instruction cycle		6.67 ns
Floating-point Unit		Yes
3.3-V on-chip flash (16-bit word)		256K
Single-access RAM (SARAM) (16-bit word)		34K
One-time programmable (OTP) ROM (16-bit word)		1K
Code security for on-chip flash/SARAM/OTP blocks		Yes
Boot ROM (8K x 16)		Yes
16/32-bit External Interface (XINTF)		Yes
6-channel Direct Memory Access (DMA)		Yes
PWM outputs		ePWM1/2/3/4/5/6
HRPWM channels		ePWM1A/2A/3A/4A/5A/6A
32-bit Capture inputs or auxiliary PWM outputs		eCAP1/2/3/4/5/6
32-bit QEP channels (four inputs/channel)		eQEP1/2
Watchdog timer		Yes
12-Bit ADC	No. of channels	16
	MSPS	12.5
	Conversion time	80 ns
32-Bit CPU timers		3
Multichannel Buffered Serial Port (McBSP)/SPI		2 (A/B)
Serial Peripheral Interface (SPI)		1
Serial Communications Interface (SCI)		3 (A/B/C)
Enhanced Controller Area Network (eCAN)		2 (A/B)
Inter-Integrated Circuit (I2C)		1
General Purpose I/O pins (shared)		88
External interrupts		8
Packaging	176-Pin PGF	Yes
	176-Pin PTP	Yes
	179-Ball ZHH	Yes
	176-Ball ZJZ	Yes
Temperature options	A: -40°C to 85°C	(PGF, ZHH, ZJZ)
	S: -40°C to 125°C	(PTP, ZJZ)
	Q: -40°C to 125°C	(PTP, ZJZ)

TABLA 5 CARACTERÍSTICAS DEL DSP

Las principales características de este microcontrolador se recogen en la tabla 5.

La programación del microcontrolador se lleva a cabo en la herramienta simulink de Matlab. El diagrama de programación de la figura 36 corresponde al que se da en este caso. Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Para lograr la monitorización de las variables sin embargo no se puede realizar directamente en simulink, hay que emplear la aplicación Code Composer, que es realmente la que realiza la programación. Se adjunta un tutorial de la instalación del software y comunicación del software para su correcto funcionamiento (anexo 1).

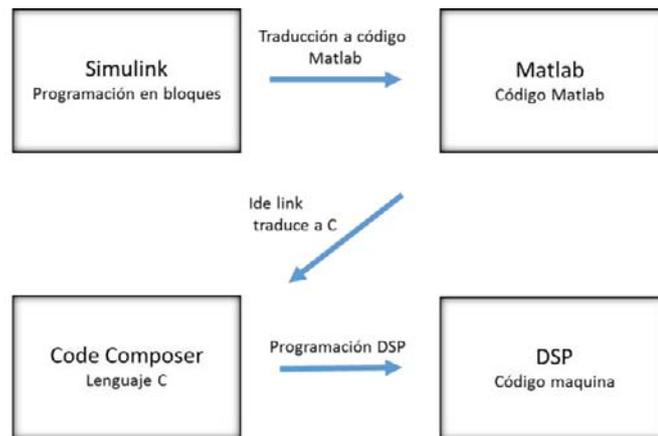


FIGURA 35 PROGRAMACIÓN DEL DSP

1.6.2 Elementos del circuito de potencia

1.6.2.1 Rectificador de tiristores

Para poder cargar la etapa de continua de los inversores se ha empleado un rectificador trifásico controlado de seis pulsos formado por tiristores, el rectificador dispone de un control manual mediante un potenciómetro que permite ajustar el valor de la tensión, con este regulador se pueden realizar pruebas a baja tensión para no poner en peligro la integridad del resto de componentes.

Con el motivo de proteger el rectificador se incluye un interruptor magneto térmico de 16 amperios, además debido a que en estos dispositivos electrónicos pueden crear corrientes altas velozmente, también se incorporan fusibles de alta velocidad como protección adicional.

El rectificador permite una corriente máxima de 96 amperios que es la corriente nominal del tiristor SKKT92/16E. La tensión máxima será de 540 voltios correspondiendo al valor que se obtiene de la ecuación 7 teniendo en cuenta la tensión de línea son 400 voltios. El conjunto del equipo se observa en la figura 37.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{Linea} (7)$$

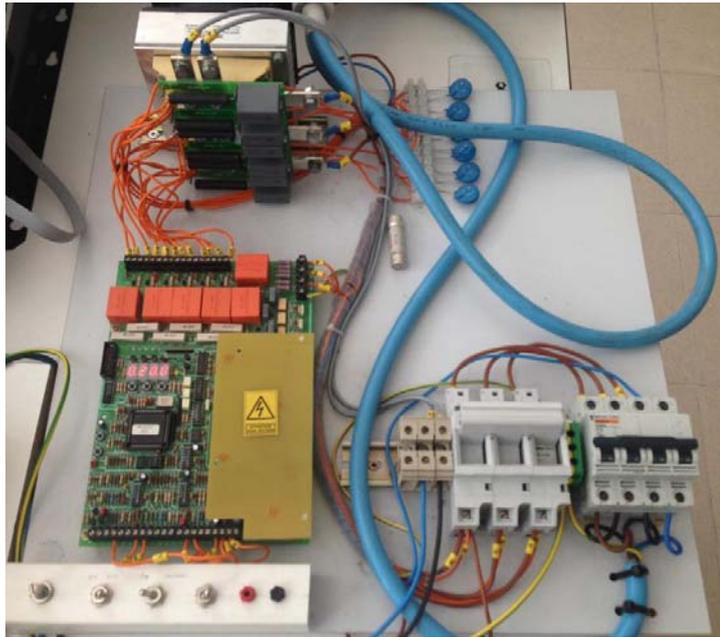


FIGURA 36 RECTIFICADOR CONTROLADO

1.6.2.2 Inversor

Se dispone de dos inversores trifásicos SKS 35F como los de la figura 38, estos inversores contienen un convertidor trifásico compuesto por 6 IGBT, un rectificador trifásico no controlado de 6 diodos y una etapa de continua con condensadores.

Debido a que el rectificador es no controlado, se ha preferido añadir el rectificador controlado externo y conectarlo directamente a la conexión de continua, la seguridad de realizar pruebas a baja tensión es la razón.

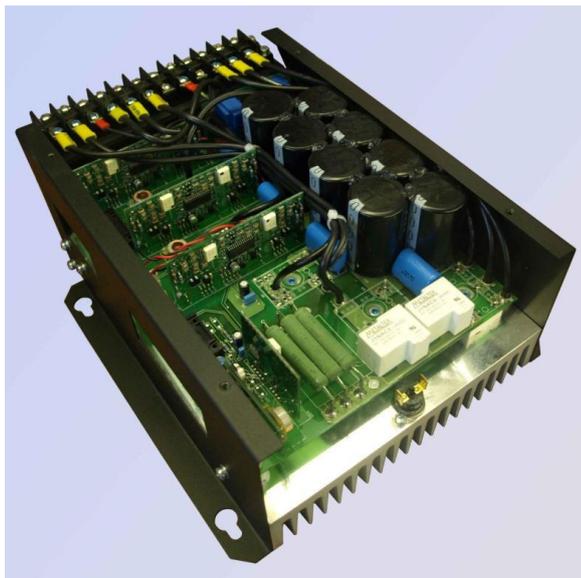


FIGURA 37 INVERSOR TRIFÁSICO SKS 35F



FIGURA 38 BORNEO DE POTENCIA DEL INVERSOR

Como muestra la figura 39, existe una conexión directa de alimentación de continua que permite cargar el banco de condensadores interno. Los contactos R, S, T son la entrada del rectificador no controlado. La salida corresponde a los contactos W, U, V.

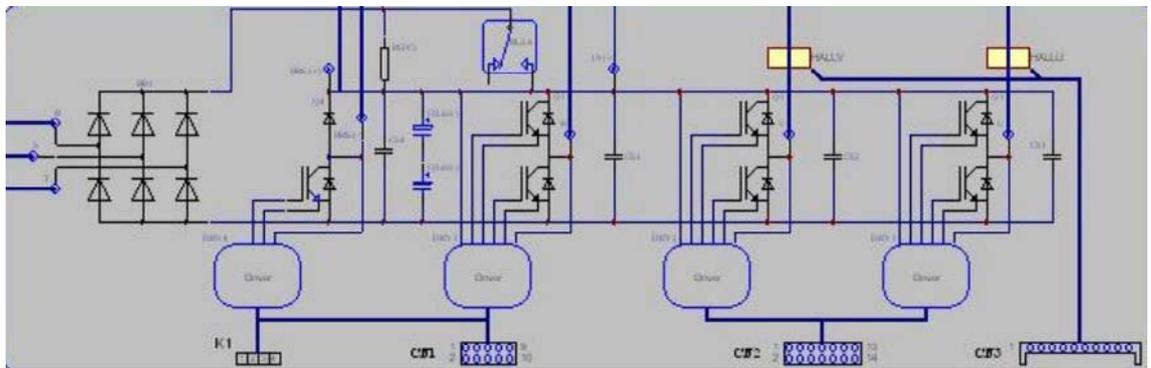


FIGURA 39 ESQUEMA INTERNO DE INVERSOR DEL FABRICANTE

Las principales características del inverter están recogidas en la figura 41.

Características	
Tensión Vac	380 V
Corriente máxima rms	35 A
Frecuencia máxima	10 KHz
Tensión máxima condensadores	750 V
Capacidad condensadores	2040 μ F

FIGURA 40 CARACTERÍSTICAS INVERSOR

1.6.2.3 Inductancias de filtrado

Los convertidores de potencia son propensos a crear perturbaciones en la red, pero muchos de los problemas de perturbaciones en baja tensión pueden ser corregidos mediante filtros.

La función de las inductancias es filtrar los armónicos que producen los inversores. Debido a que los inversores conmutan a una frecuencia muy alta, los armónicos que se encuentran son de alto orden, por lo que el valor de la inductancia no es necesario que sea muy alto. Otra capacidad que aportan es la limitación de las corrientes de cortocircuito y aumentar la seguridad de los semiconductores del convertidor.



FIGURA 41 INDUCTANCIA DE FILTRADO

Los valores que se encuentran en el montaje son de 2 y 3 mH, siendo este valor aproximadamente el recomendado de 0,015 pu. Se consideran las cargas resistivas descritas a continuación para la potencia total. Una de las inductancias del banco puede verse en la figura 42.

$$Z_{base} = \frac{3 * V_{fase}^2}{P_{total}} \quad (8) \quad Z_{L pu} = \frac{Z_L}{Z_{base}} \quad (9)$$

1.6.2.4 Cargas Resistivas

El montaje cuenta con un banco de cargas resistivas que actuará como consumo, en concreto el que aparece en la figura 43. El valor es ajustable mediante unos selectores permitiendo realizar pruebas a diferentes condiciones de carga. La potencia máxima del conjunto de cargas es de 4 kW.

Debido a la potencia máxima de estas cargas, la corriente máxima es de 5,8 amperios. Para la selección del conductor, el factor limitador es la corriente máxima admisible ya que las distancias son ínfimas en el montaje, esta es de 12 amperios para una sección de 1,5mm²



FIGURA 42 CARGAS RESISTIVAS

1.6.3 Fases del desarrollo

En un proyecto anterior se realizó el desarrollo de los elementos electrónicos que componen el banco, estos son: el equipo de medidas, la tarjeta de disparos y errores del DSP, fuentes de alimentación y las placas para la interconexión de equipos.

La primera etapa de este proyecto ha consistido en asegurar el correcto funcionamiento y realizar las correcciones oportunas a los equipos del banco, realizando la calibración de las medidas y montajes para probar los equipos.

En primer lugar para calibrar el dispositivo de medidas, se realizó un montaje con las cargas y tensiones variables de la mesa de trabajo del laboratorio. La placa de disparos y el inversor se probaron en vacío, alimentando la etapa de continua del inversor con la mesa de trabajo y aumentando la tensión paulatinamente. A continuación se conectaron las cargas del laboratorio al inversor, un filtro formado por las inductancias y condensadores de la mesa de trabajo y se añadió el dispositivo de medidas para obtener la potencia activa y reactiva consumidas por las cargas y el filtro. Con todo el equipo ya testado se ha intentado añadir el segundo inversor tal como muestra la figura 44, empleando las cargas y filtro del banco de trabajo del laboratorio.

La siguiente etapa ha consistido en realizar el montaje utilizando los equipos del banco de pruebas en lugar del banco de prácticas del laboratorio. Una vez completado el montaje se prevé la ampliación del mismo, añadir un tercer inversor puede ser interesante para corroborar que la estrategia de control es válida. También es posible que la sustitución de las cargas por un convertidor controlado, su función sería emular el enlace de continua VSC HVDC y probar así sus estrategias de control.

1.6.4 Circuito Eléctrico

1.6.4.1 Montaje actual

Para lograr simular una red offshore en primer lugar se ha realizado este montaje. El objetivo es lograr afianzar el control de los inversores en paralelo antes de añadir más elementos, ya que pueden aparecer corrientes muy elevadas si el control no es lo suficientemente preciso. Añadir que las fuentes de alimentación disponen de sus correspondientes protecciones que no aparecen en la figura 44, es decir un interruptor magnetotérmico adicional y un interruptor diferencial. Se dispone de las medidas de corriente de los inversores y de la tensión en las cargas para realizar el control.

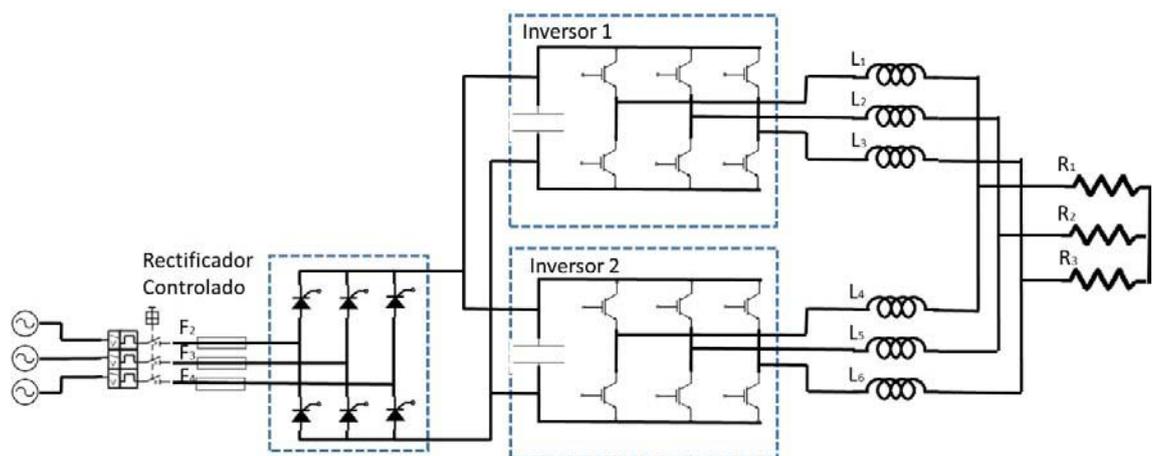


FIGURA 43 CIRCUITO ELÉCTRICO MONTAJE ACTUAL

1.6.4.2 Montaje expandido

Este montaje aún no se ha realizado, la idea es poder probar además de las estrategias de conexión de los inversores a la red alterna offshore, la estrategia correspondiente al convertidor de continua del enlace VCS HVDC, en la figura 45 se observa cómo se añade una carga en la etapa de continua, generando un consumo que generaría un inversor conectado a red. Se propone añadir también un inversor adicional con el fin de corroborar que la estrategia desarrollada para su control es correcta.

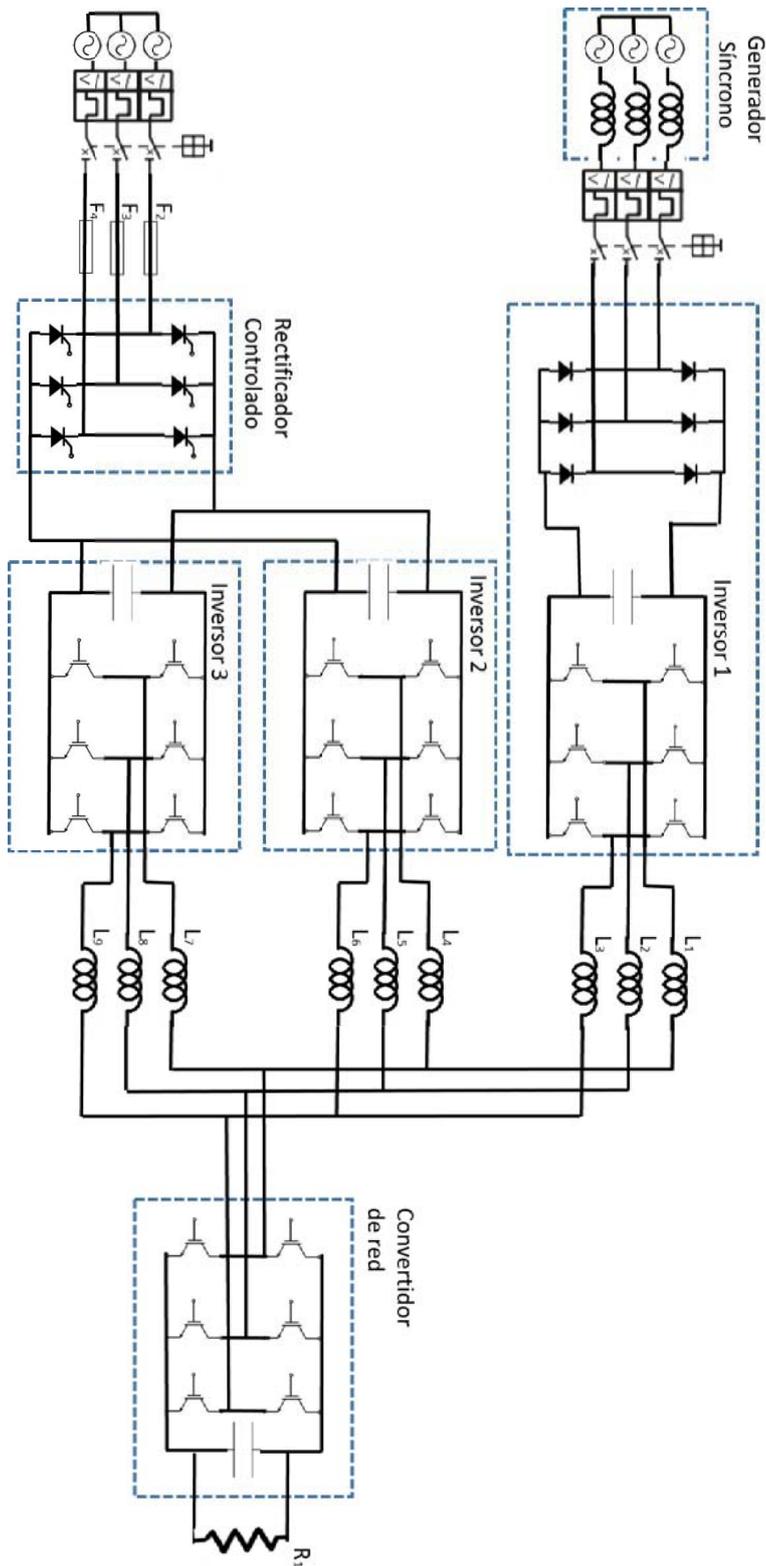


FIGURA 44 ESQUEMA DEL MONTAJE EXPANDIDO

1.6.5 Esquemas de control

Las estrategias de control se implementan en el microcontrolador empleando para ello el sistema de programación visual por bloques Simulink. Se han establecido dos pasos

para realizar el control, en primer lugar se tratará de lograr que un inversor se conecte a una red creada por otro. El primer inversor tendrá una consigna fija de tensión y de frecuencia, se calcularán los pulsos de disparo mediante la modulación SVPWM y se medirá la corriente únicamente como medio de protección del inversor. Básicamente el comportamiento es el de una fuente ideal de tensión. Para poder controlar el segundo inversor, será necesario medir las tensiones que ha generado el primero y mediante un circuito PLL extraer el ángulo de la señal. Conocer el ángulo de la tensión permitirá cambiar el sistema de referencia de tensiones y corrientes, de un sistema trifásico temporal a coordenadas d-q, este paso es importante para el control ya que si este ángulo se calcula correctamente los valores de tensión y corrientes no varían en relación con el ángulo y permite emplear controladores de tipo PID. Conocida la tensión de la red se calcula la tensión que debe generar el segundo inversor para inyectar las corrientes que fijan las referencias de potencia activa y reactiva. Se trata de resolver el problema propuesto por la figura 46, sabiendo que la tensión V_{2s} es la tensión que genera el inversor 1 y que la tensión V_{1s} es la que se debe generar en el inversor 2. Las siguientes ecuaciones se pueden emplear para realizar el cálculo de la tensión a generar (10) (11), realizando previamente un cambio de coordenadas y teniendo en cuenta que el sistema se alinea con la tensión V_{2s} .

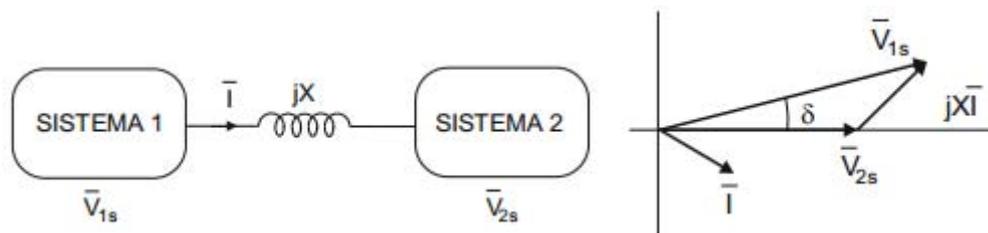


FIGURA 45 PROBLEMA ELÉCTRICO

$$P_{2f} = \frac{V_{1s}V_{2s}}{X} \text{Sen}(\delta) \quad (10) \quad Q_{2f} = \frac{V_{1s}V_{2s}\text{Cos}(\delta) - V_{2s}^2}{X} \quad (11)$$

Para asegurarse de que no ocurre ningún error previo a la conexión de ambos inversores simultáneamente, se prueba el sistema con el segundo inversor en circuito abierto y comprobando realmente que tensiones genera tras el retardo experimental que genera el sistema de medidas y el cálculo de las conmutaciones del inversor. Una vez realizado este paso, se puede probar su conexión con referencia de potencia activa y reactiva 0 tratando únicamente de sincronizarse con la red ya presente, tras lo cual se puede modificar la referencia de potencia.

El objetivo final consiste en aplicar otro tipo de control, el control con droops de la tensión de la red offshore. Se ha barajado la posibilidad de entrar directamente en este tipo de control para ambos inversores, asumiendo la aparición de transitorios en las corrientes de gran valor, pero tras una prueba prematura donde se encontraron corrientes muy elevadas, se ha decidido por comenzar el sistema con el control descrito anteriormente y tras esto,

cambiar el modo de control a droops. Es posible que mejorando el sistema de medidas y el bloque de sincronización se redujeran estas corrientes transitorias.

El procedimiento de conexión comenzaría por conectar el primer inversor con control directamente con droop sin carga, esto llevaría el inversor a funcionar en un punto de frecuencia conocido, por ejemplo 52 hercios. A continuación se sincroniza el segundo inversor al primero de la misma forma que se realiza en el control anterior, después se cambia el modo de control a droop asegurándose de que no se produzca un salto en el ángulo para evitar transitorios elevados. Una vez sincronizados los inversores, ya se puede incrementar la carga.

1.6.5.1 Control de un inversor conectado a una red creada por otro inversor

Seguidamente se describen con más exactitud los bloques que forman el programa de control que actualmente se realiza, puede verse una visión general en la figura 56.

En primer lugar se encuentra el bloque “caja medidas”, este bloque contiene los conversores ADC, como se observa en la figura 47. Estos conversores son de 12 bits y la entrada en tensión es de 0-3 voltios por lo que para obtener el valor de la tensión hay que realizar una transformación. La transformación se lleva a cabo en los bloques que se encuentran a continuación, se han creado con la intención de que sean configurables para poder adaptarlo en función de las necesidades (figura 48). Internamente se realizan los cálculos oportunos para adaptar las señales desde el valor digital obtenido por el ADC hasta el requerido. En este caso las medidas que se utilizan son las tres tensiones de las cargas y las seis corrientes, correspondientes a cada una de las ramas de los inversores. Además de las medidas de corrientes y tensiones se encuentra una tercera salida del bloque general, contiene las corrientes en valor temporal, pero esta salida está destinada a la protección de los inversores, por lo que no se debe modificar su configuración. La función de los bloques intermedios con respecto a la salida del bloque es almacenar valores para poder ser visualizados en el Code Composer, porque de otra forma solo podemos acceder a la variable que comunica directamente con el programa, y la tasa de refresco está limitada a un valor demasiado bajo para poder observar señales que varían de forma rápida, como las tensiones o las corrientes instantáneas.

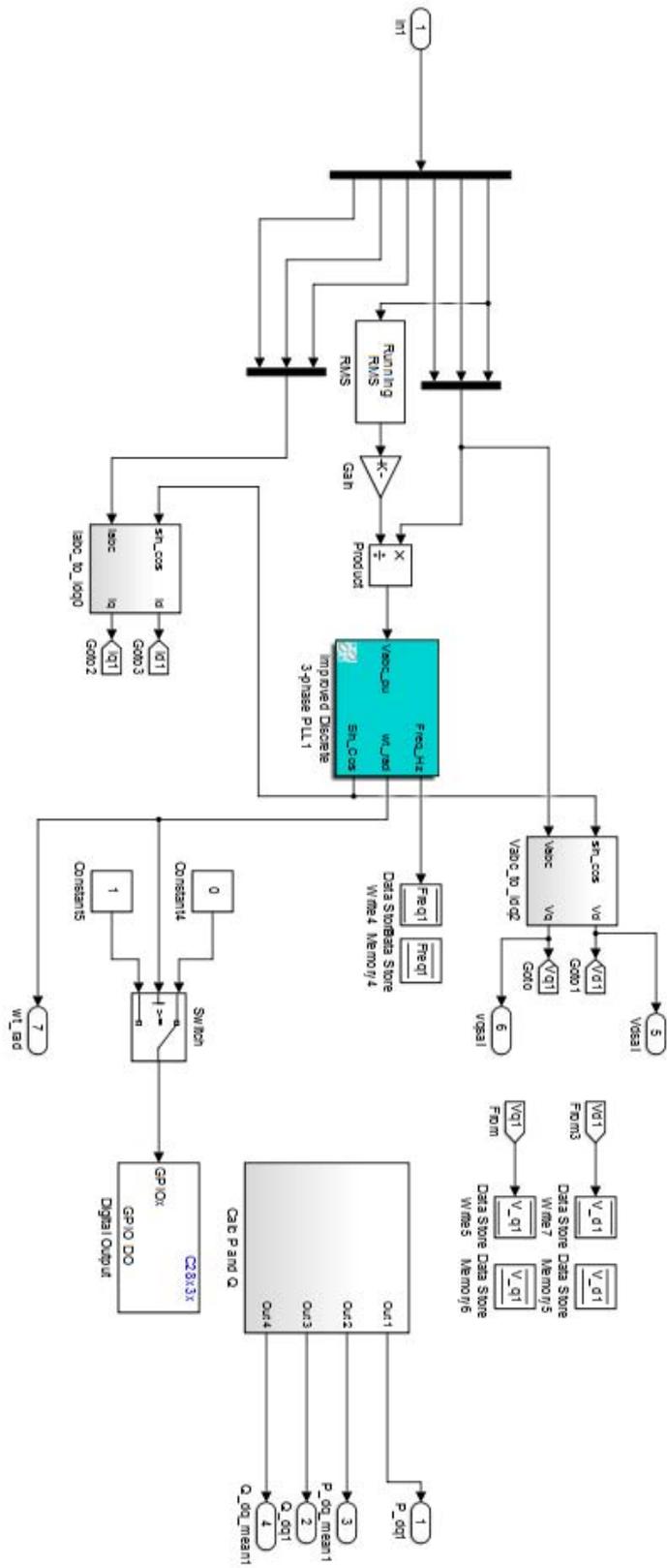


FIGURA 48 MEDIDA DE POTENCIAS Y PLL

Se reciben las señales de tensión y corrientes de los inversores, en este caso corresponde al bloque del primer inversor. El bloque marcado en azul contiene el circuito PLL recibe las señales de tensión en valor pu. Debe dar como salida el ángulo, que se utiliza para las conversiones de las señales. También proporciona el valor de la frecuencia, que será empleado en el siguiente control para la implementación de los droops. Además de estas salidas también se proporciona el valor del seno y el coseno para poder implementar ecuaciones de forma sencilla.

Internamente el circuito PLL contiene un control PI que se debe ajustar empleando la ventana de dialogo (figura 50).

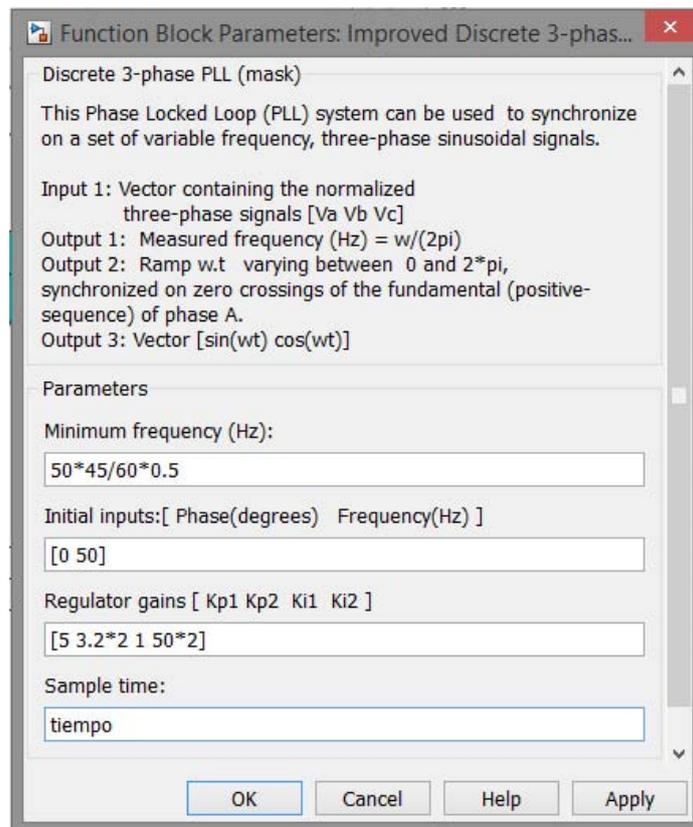


FIGURA 49 DIALOGO DE CONFIGURACIÓN PLL

Los valores que se muestran son los que se encuentran por defecto para un sistema de tensiones trifásico. Actualmente se está trabajando en este bloque para lograr la máxima precisión posible. La figura 52 expone el funcionamiento interno de la PLL, es un bucle cerrado que se podría dividir en tres etapas. La etapa inicial recibe las tensiones temporales normalizadas en pu y realiza una transformación de coordenadas a d-q. Para asegurar que el ángulo que se obtiene es el adecuado, se fija la referencia en V_q , esta tensión debe ser 0 siempre que el ángulo sea el correcto. De esta forma cuando incrementa o decrementa el valor de V_q es empleado como señal de error que se introduce en la segunda etapa, esta segunda etapa consta de un controlador PI, la salida del bloque corresponde a la velocidad

angular, el control suma o resta un valor a la velocidad base, el valor base corresponde a la velocidad que resulta de una frecuencia de 50 Hz (ecuación 12)

$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

Tras hallar la velocidad angular de la señal, el valor se integra para obtener el ángulo formando una recta creciente. En el modelo proporcionado estándar, existía un error de cuantificación digital debido a que la integral no se reiniciaba y el valor que puede representarse con una variable de tipo coma flotante pierde resolución al incrementar su valor, al realizar una normalización del valor tras la integral, se perdía gran cantidad de información y el error resultante llevaba el sistema a ser inestable. Este problema se ha solucionado añadiendo un reinicio forzado al llegar a cierta cantidad. La formalización del valor es necesaria para poder obtener una salida en forma de diente de sierra con un valor que incrementa de 0 a 2π , se puede ver la forma de onda requerida en la figura 51, el periodo de la señal debe corresponder a la frecuencia detectada por la PLL.

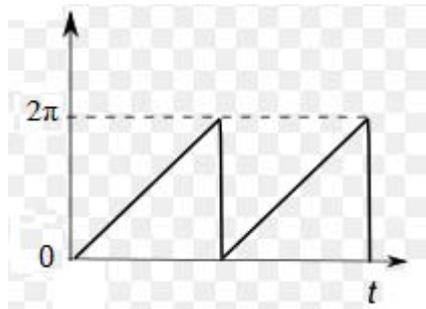


FIGURA 50 FORMA DE ONDA DEL ÁNGULO

El valor del ángulo se realimenta y se cierra el bucle con la transformación de las tensiones que generaran de nuevo la tensión V_q y con ello el error que se introduce en el controlador PI.

Continuando con la figura 49, habiendo obtenido el ángulo mediante el circuito pll se realiza la transformación de las tensiones y las corrientes para usos posteriores y para realizar el cálculo de las potencias activa y reactiva, este cálculo es realizado por el último elemento que se encuentra, correspondiendo a las ecuaciones 13 y 14.

$$P = \frac{3}{2}(V_q I_q + V_d I_d) \quad (13) \quad Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d) \quad (14)$$

En la parte superior de la figura 56 encontramos el control del primer inversor, este con la referencia fija de tensión y frecuencia funciona como una fuente de tensión ideal. En el bloque tras la referencia se genera el valor del ángulo con la frecuencia determinada por la referencia en forma de recta, como en el caso de la PLL. En último lugar encontramos el bloque que contiene los disparos de los inversores y la modulación SVPWM.

La modulación SPWM requiere en la entrada una referencia de tensiones en las coordenadas α - β , para ello se dispone de un bloque especial de conversión. Estas funciones están optimizadas por Texas instruments para realizar los cálculos necesarios con las operaciones mínimas y se pueden encontrar en las librerías suministradas con los packs de programación de DSP de Matlab. El único requerimiento especial para usar esta función es que se debe entregar los datos en un formato diferente al habitual, con este fin se dispone de un elemento de conversión de tipo de dato previo a la transformación.

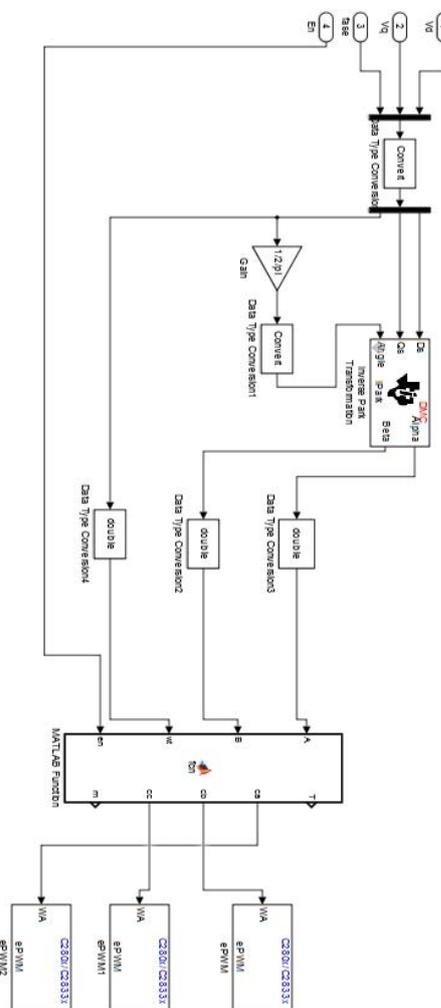


ILUSTRACIÓN 52 MODULACIÓN SVPWM Y SALIDA INVERSORES

Una vez realizada la conversión se puede suministrar las señales a la modulación SVPWM, se ha añadido además la señal de protección “EN”, en caso de no estar activada los pulsos son bloqueados y la salida se encuentra abierta automáticamente. La principal parte del código de la modulación SVPWM consiste en el cálculo de los tiempos de los

disparos en función de la posición del vector referencia, en la figura 54 se observa un fragmento de esta parte del código. Previamente se ha calculado el valor de m en función de la modulación es decir el valor de tensión final y el sector de disparo n.

```

t1=m*2*T*sin(pi/3-a+(n-1)*pi/3);
t2=m*2*T*sin(a-(n-1)*pi/3);
to=2*T-t1-t2;

switch n
case 1
ca=to/4;
cb=ca+t1/2;
cc=cb+t2/2;
case 2
cb=to/4;
ca=cb+t2/2;
cc=ca+t1/2;
case 3
cb=to/4;
cc=cb+t1/2;
ca=cc+t2/2;
case 4
cc=to/4;
cb=cc+t2/2;
ca=cb+t1/2;
case 5
cc=to/4;
ca=cc+t1/2;
cb=ca+t2/2;
case 6
ca=to/4;
cc=ca+t2/2;
cb=cc+t1/2;
-end

```

FIGURA 53 CÓDIGO CALCULO PWM

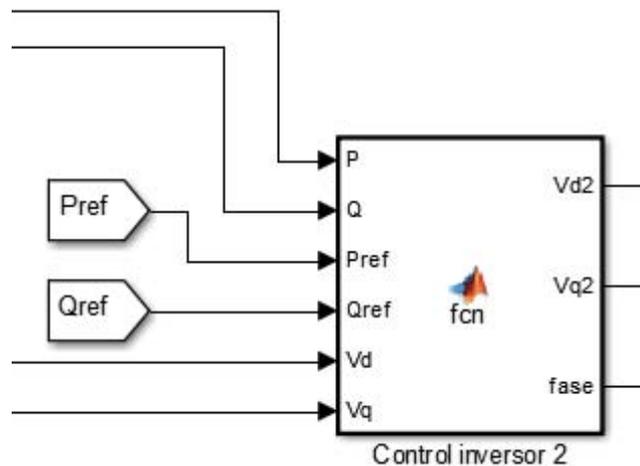


FIGURA 54 CÁLCULO DE LA REFERENCIA DEL SEGUNDO VECTOR

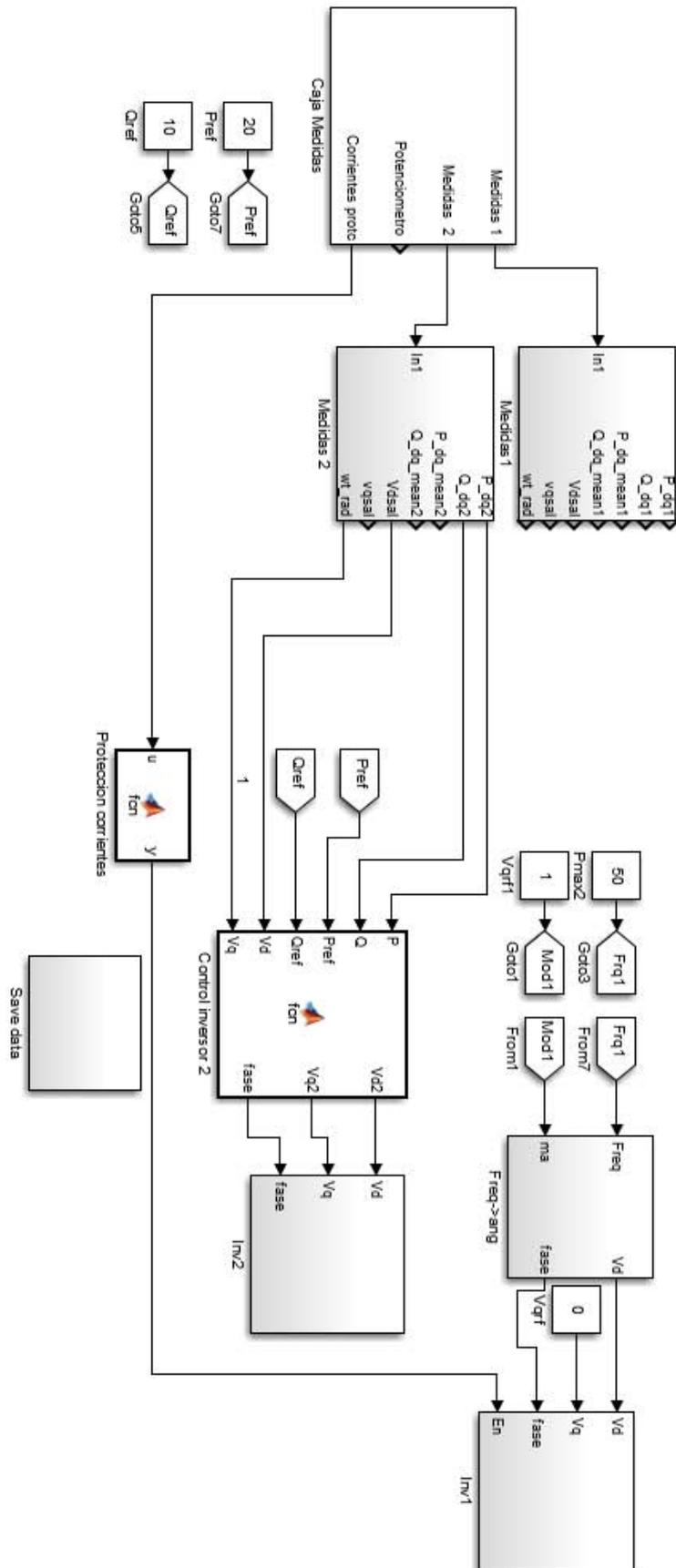


FIGURA 55 BLOQUES DE CONTROL, ESQUEMA COMPLETO

1.6.5.2 Control de dos inversores en paralelo con droops

El objetivo de este control es que ninguno de los dos inversores sea concretamente el que genera la referencia y puedan funcionar sincronizados pese a ello. Este control se encuentra en desarrollo actualmente, únicamente se realizan observaciones de como deberá ser la composición de los bloques.

En la figura 56 se observa el esquema general de control, pero en este caso se añaden nuevos bloques para el inversor 1. Una vez sincronizados este nuevo bloque debe entrar en funcionamiento, calculando la referencia de tensión y frecuencia por medio de la pendiente de los droops. Los bloques de medidas así como los inversores y transformaciones pueden conservarse. Se han añadido los bloques del cálculo de la frecuencia y la tensión en función de la potencia activa y reactiva para generar los pulsos tras el droop. El bloque del segundo inversor debe detectar cuando este está sincronizado. Tras una temporización una de seguridad, dará la señal de salida para activar los droops y desactivar los controles anteriores.

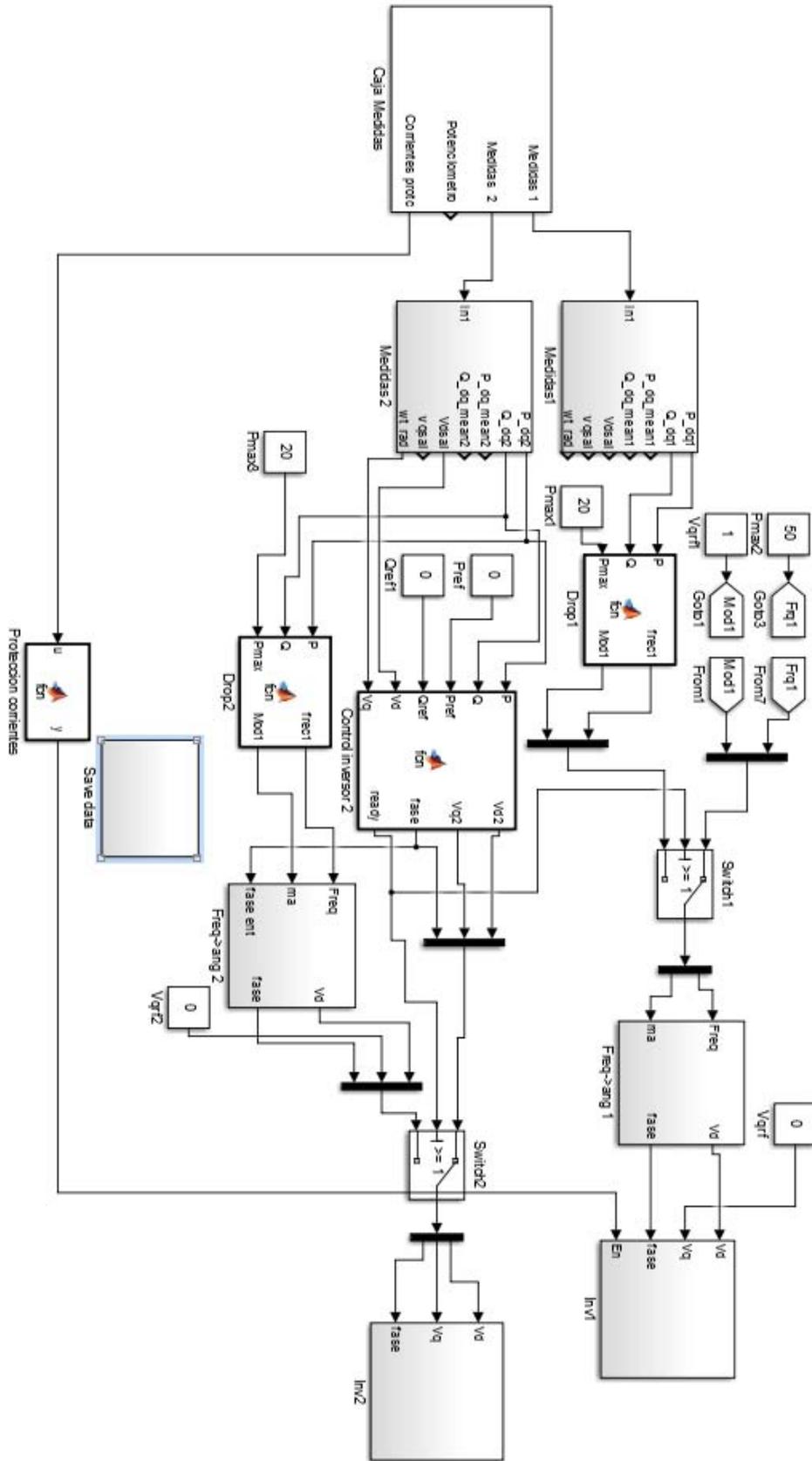


ILUSTRACIÓN 56 ESQUEMA DEL CONTROL CON DROOPS

2 Presupuesto

A continuación se detallan los costes que se han incurrido en la realización de este proyecto.

Costes de material				
Componente	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Reactancias inductivas	2 mH , 30 A	2	49,20 €	98,40 €
Reactancias inductivas	3 mH , 30 A	2	63,70 €	127,40 €
Banco cargas resistivas	4kW , carga variable	1	1.200,00 €	1.200,00 €
Inversor semikron	SKS 35F	2	1.554,00 €	3.108,00 €
Equipos de medida		2	376,83 €	753,66 €
Tarjeta de disparos		1	79,53 €	79,53 €
Microcontrolador DSP	delfino F28335	1	201,00 €	201,00 €
Rectificador controlado		1	561,00 €	561,00 €
Total				6.128,99 €
Coste del trabajo				
Concepto	Trabajo	Cantidad	Precio unitario	Total
Horas ingeniero				
	Diseño tarjetas	150	20,00 €	3.000,00 €
	Construcción tarjetas	220	20,00 €	4.400,00 €
Horas tecnico laboratorio				
	testeo equipos	135	10,00 €	1.350,00 €
	montaje banco	62	10,00 €	620,00 €
	Desarrollo control	52	10,00 €	520,00 €
Total				9.890,00 €
Total presupuesto:			16.018,99 €	

El coste total del proyecto contando la mano de obra y los materiales asciende a dieciséis mil diecinueve euros.

3 Anexos

3.1 Tutorial instalación y comunicación de Matlab y Code Composer

A continuación se describen los pasos de instalación y configuración a seguir para llegar a compilar un programa creado en la herramienta SIMULINK y poder ejecutarlo en una tarjeta de la serie C2000 de Texas instruments.

El software empleado es Matlab 2013b 32 bits, Code Composer V5.3 y Microsoft Windows 8. Se debe destacar que ninguna de las versiones posteriores a Matlab 2013 detecto los directorios de instalación de Code Composer .La versión de Matlab2013a es la única en la que se ha logrado la instalación del complemento para programar tarjetas C2000

.El primer paso es instalar Matlab2013b. Se debe tener en cuenta que el complemento Embedded Coder debe ser instalado adicionalmente, para ello hay que asegurar su selección cuando aparece el cuadro de dialogo. El aspecto del cuadro de dialogo corresponde a la figura 58. También hay que fijarse en la versión, debe ser la de 32 bits ya que por defecto selecciona 64 bits. Para asegurarse hay que dirigirse al directorio correspondiente tal como muestra la figura 57.En caso de seleccionar el programa de 64 bits puede dar problemas en la conexión del Matlab con el Code Composer.

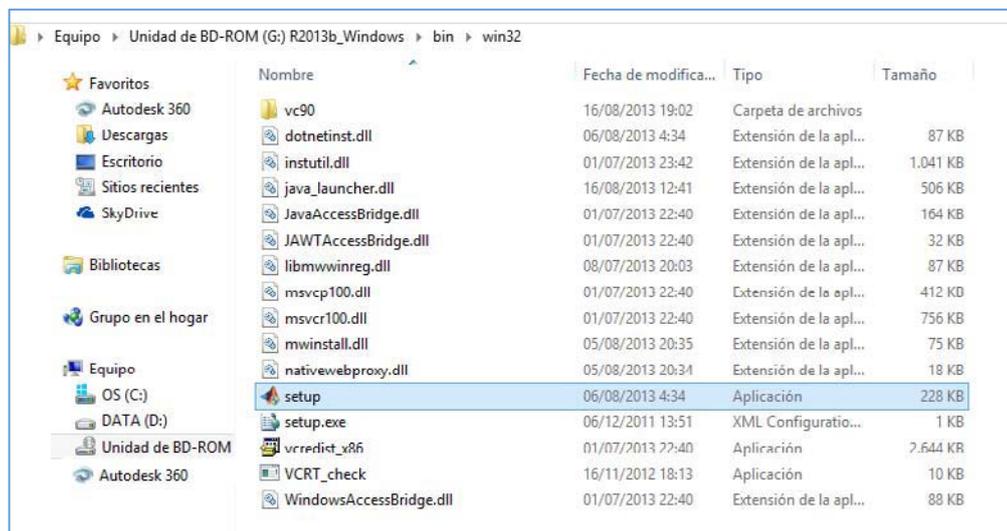


FIGURA 57 INSTALADOR MATLAB 32 BITS

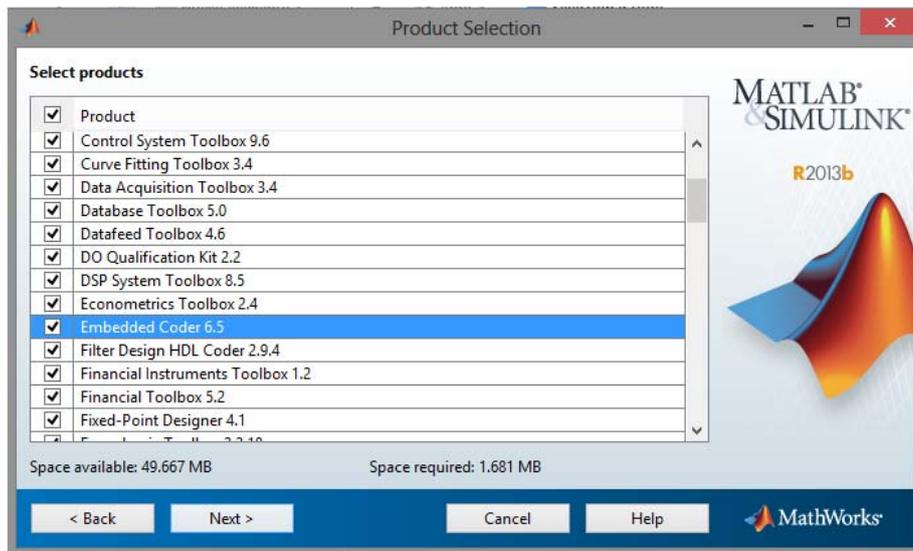


FIGURA 58 SELECCIÓN EMBEDDED CODER

Para continuar se debe instalar el programa Code Composer. Este puede instalarse con la configuración por defecto. Puede ser interesante destacar la localización del asistente de licencias como muestra la figura 59.

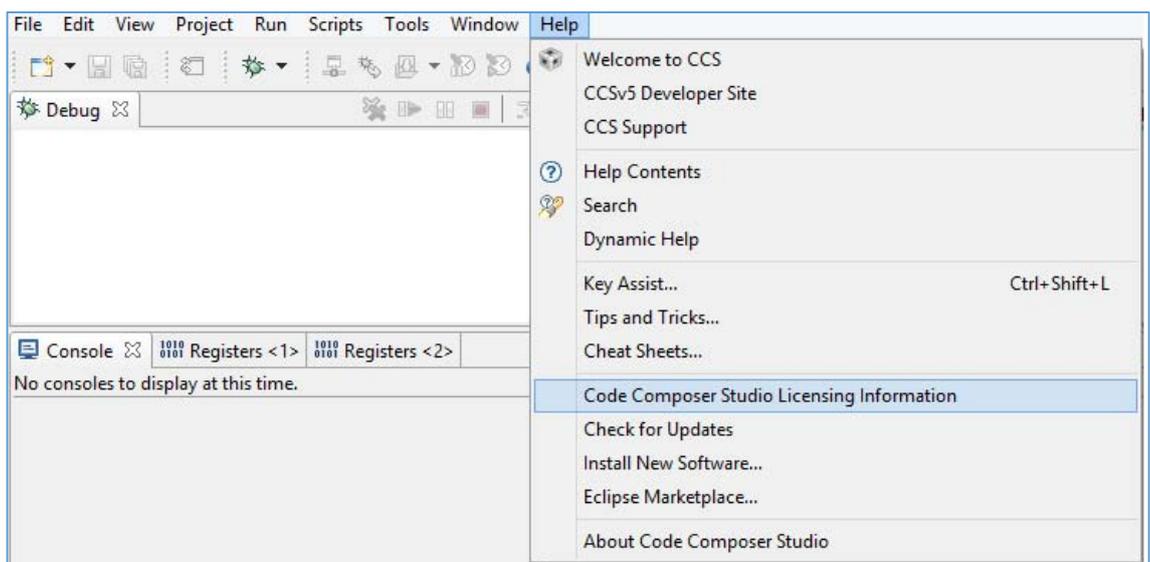


FIGURA 59 UBICACIÓN DEL LICENCE MANAGER

El siguiente paso es la configuración del compilador de Matlab, ya que es necesario tanto para el simulink como para el Embedded Coder. Para ello se ejecuta el comando “mex-setup” en la consola de Matlab. El programa debe ofrecer las diferentes opciones instaladas como muestra la figura 60.

```
Command Window

>> mex -setup

Welcome to mex -setup. This utility will help you set up
a default compiler. For a list of supported compilers, see
http://www.mathworks.com/support/compilers/R2013b/win32.html

Please choose your compiler for building MEX-files:

Would you like mex to locate installed compilers [y]/n? y

Select a compiler:
[1] Lcc-win32 C 2.4.1 in C:\PROGRA~2\MATLAB\R2013b\sys\lcc
[2] Microsoft Software Development Kit (SDK) 7.1 in C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual
[0] None

Compiler: 2
```

FIGURA 60 SELECCIÓN DE COMPILADOR SIMULINK

Se recomienda como compilador Microsoft Windows SDK 7.1. Si previamente a la instalación ya estaba instalado Microsoft Visual C++ 2010 puede dar problemas en la instalación de SDK 7.1. Una opción es desinstalar previamente Microsoft Visual para evitarlo.

También se debe instalar el pack de soporte de los chips C2000 para el Embedded Coder, para realizar esto se ejecuta el comando “targetinstaller” y utilizar las posibles opciones para añadir el ADD-ON, todas las opciones de instalación requieren conectarse a una cuenta de Matlab incluida la opción “Install from folder”. La figura 61 muestra las opciones.

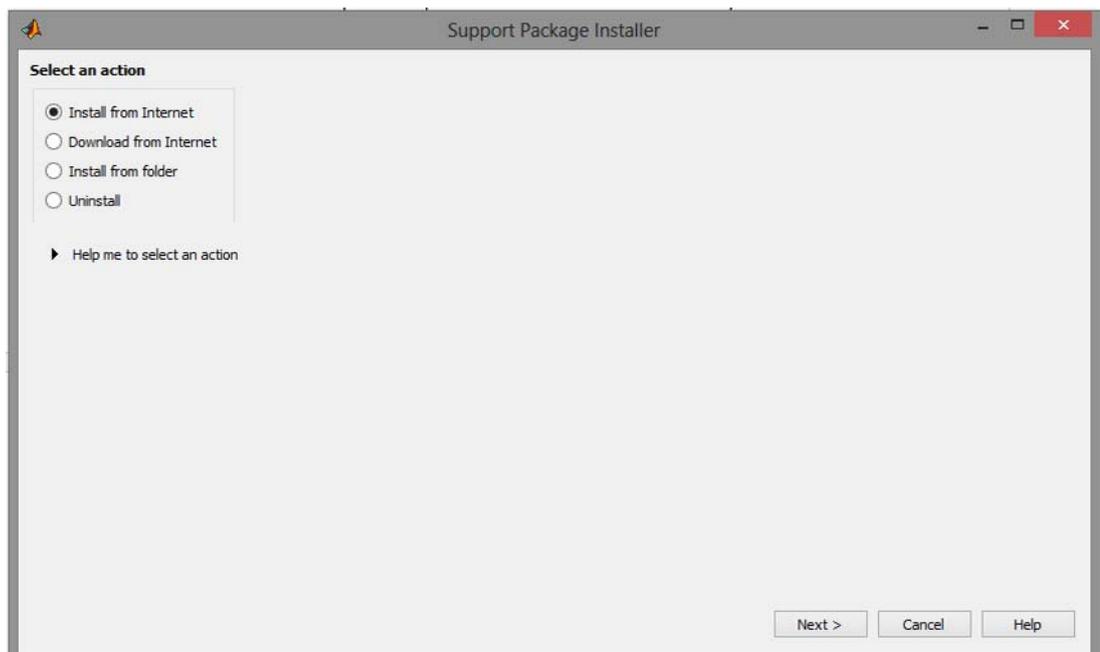


FIGURA 61 OPCIONES DE INSTALACIÓN DEL PACK C2000

Llegados a este punto, entre las librerías de Simulink se deben encontrar la de Embedded Coder y en particular la de soporte para chips C2000. El aspecto debe ser similar al de la figura 62.

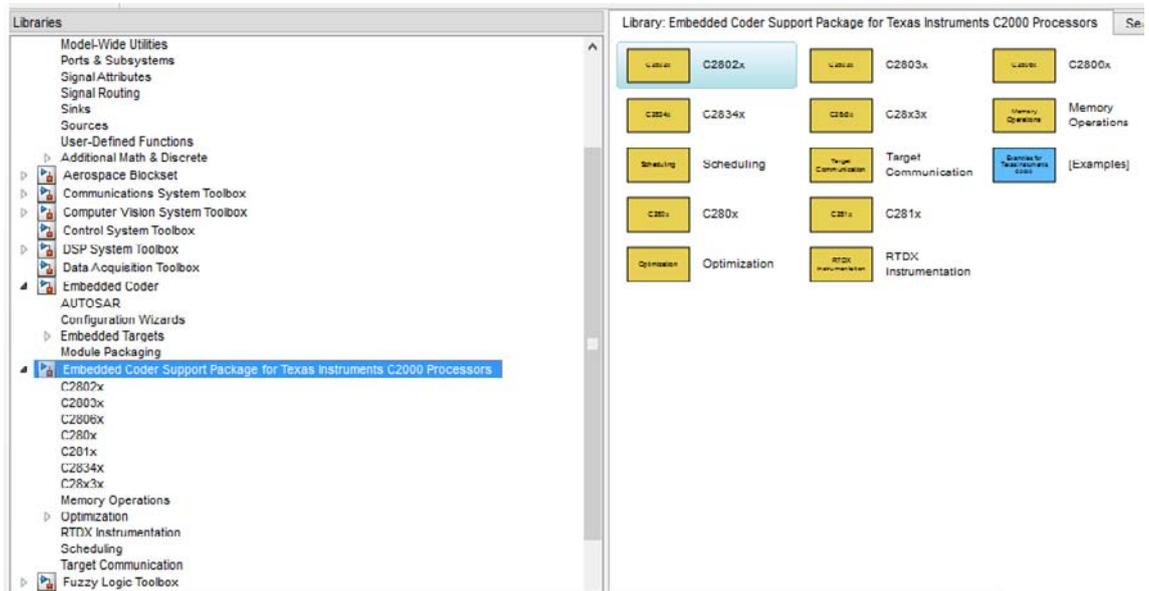


FIGURA 62 LIBRERÍAS DE SIMULINK

Una vez comprobado que todo está bien instalado, llega la etapa de comunicar Matlab con Code Composer. Se debe comenzar ejecutando el comando “xmakefilesetup” en la consola de Matlab. El objetivo de esta herramienta es localizar la instalación de CCSv5. En concreto debe encontrar el directorio de su compilador para chips C2000, la información de la BIOS y el programa de flash. Además se deben configurar algunos comandos para la ejecución del compilador. Debe aparecer una ventana como la de la figura 63.

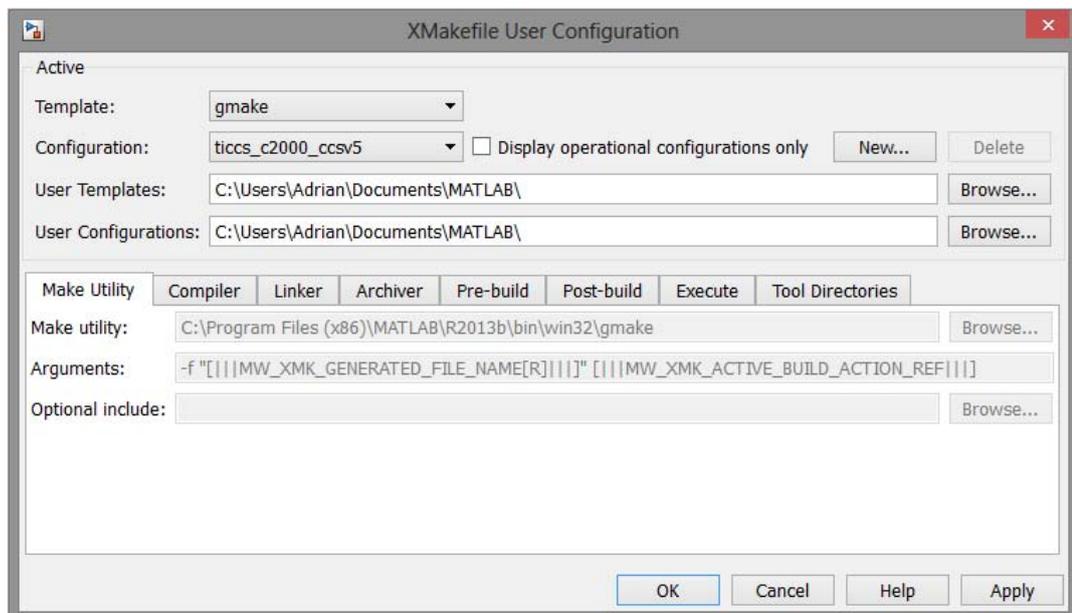


FIGURA 63 VENTANA XMAKEFILESETUP

En la pestaña “configuration” seleccionar `ticcs_c2000_ccsv5`. En principio estará oculta, por lo que se debe desmarcar el cuadro de la derecha “Display operational configurations only”. A continuación se hay que asegurarse de que en la pestaña “Tool Directories” “se dirccione correctamente a las correspondientes aplicaciones. La figura 64 muestra los directorios por defecto de CCSV5

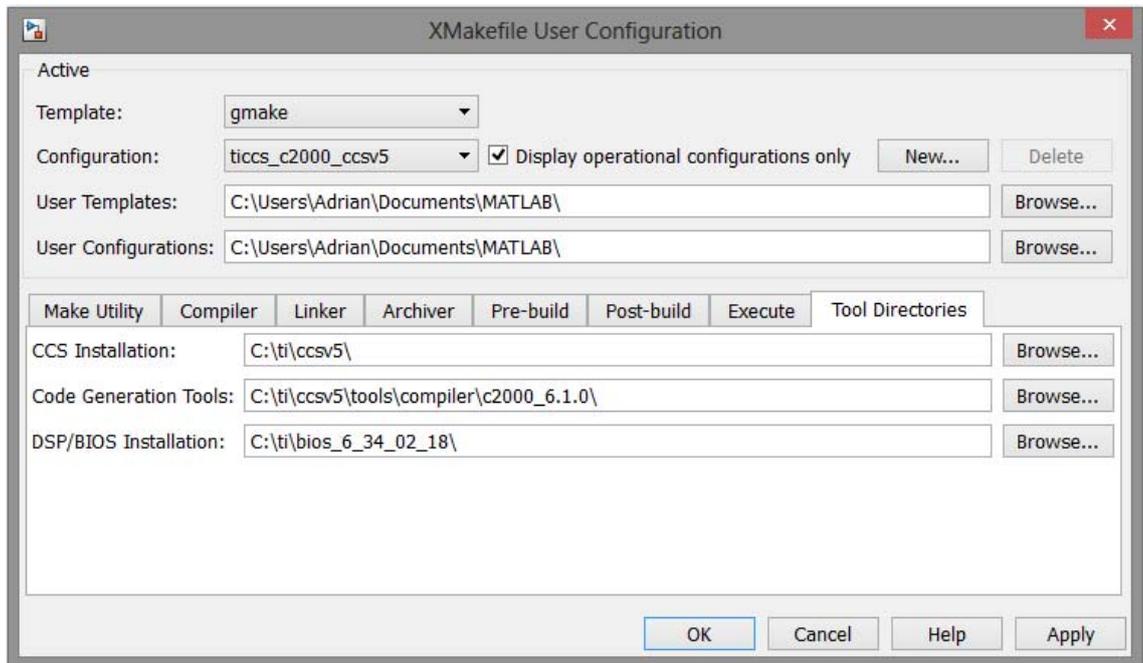


FIGURA 64 VENTANA TOOL DIRECTORIES

Para continuar se debe crear una nueva configuración seleccionando la opción “New...”. Por defecto el nombre de la nueva configuración es “`ticcs_c2000_ccsv5_clone`”. En las figuras 65,66 y 67, se pueden observar cómo deben quedar configuradas las diferentes pestañas de la herramienta.

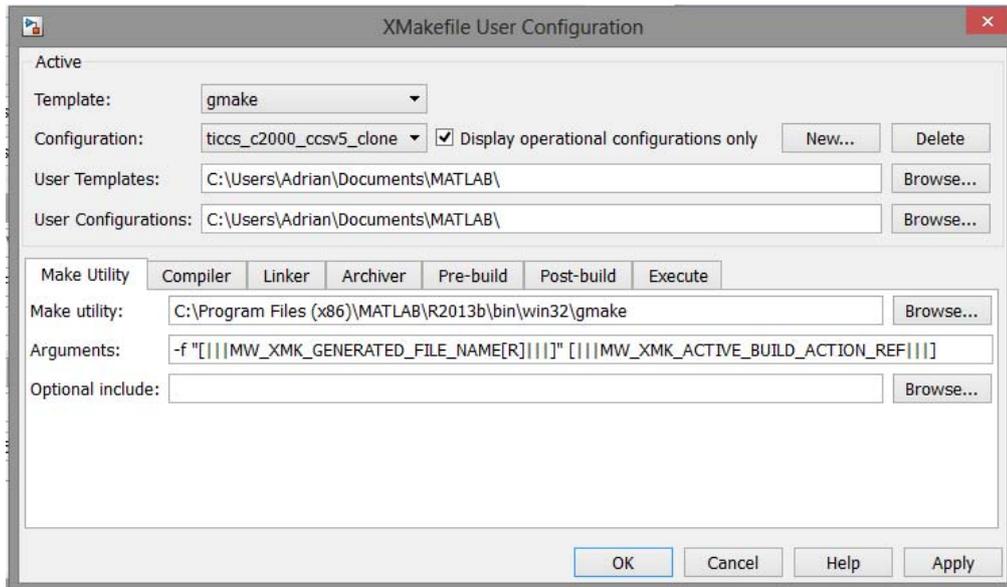


FIGURA 65 OPCIONES DE CONFIGURACIÓN, PESTAÑA INICIAL

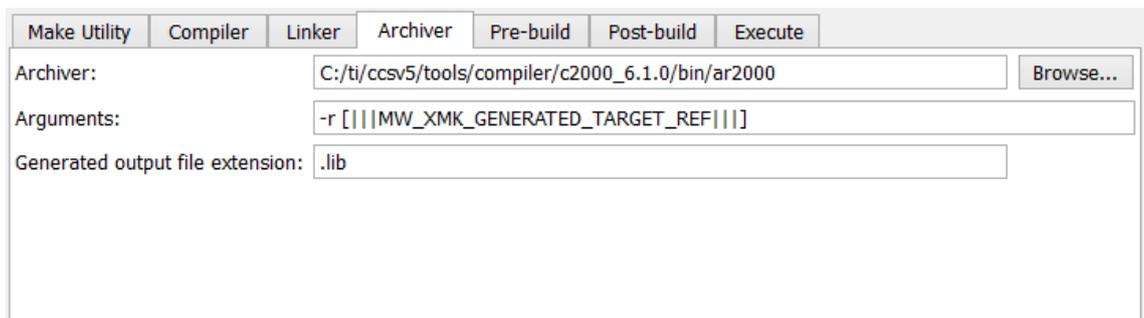
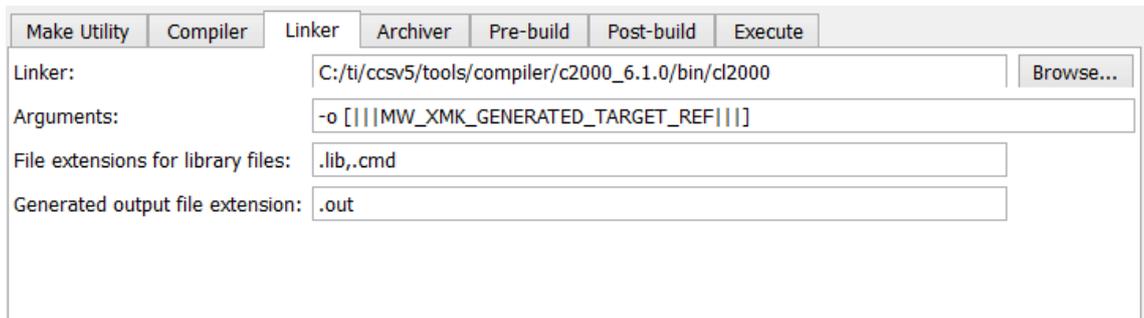
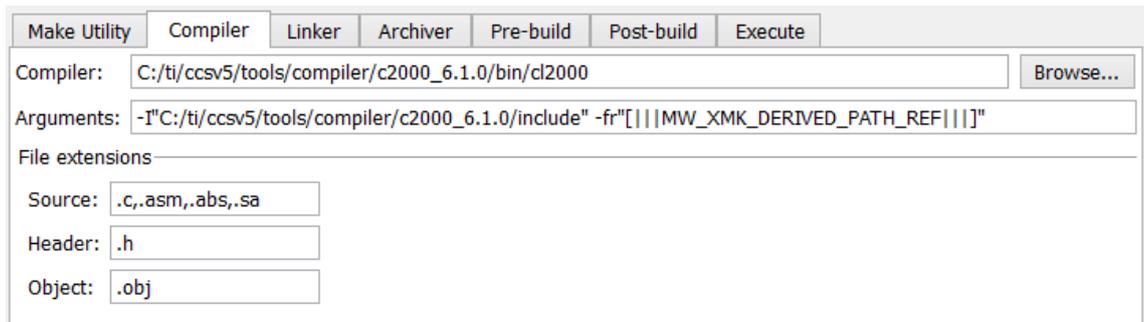


FIGURA 66 PESTAÑAS DE CONFIGURACIÓN

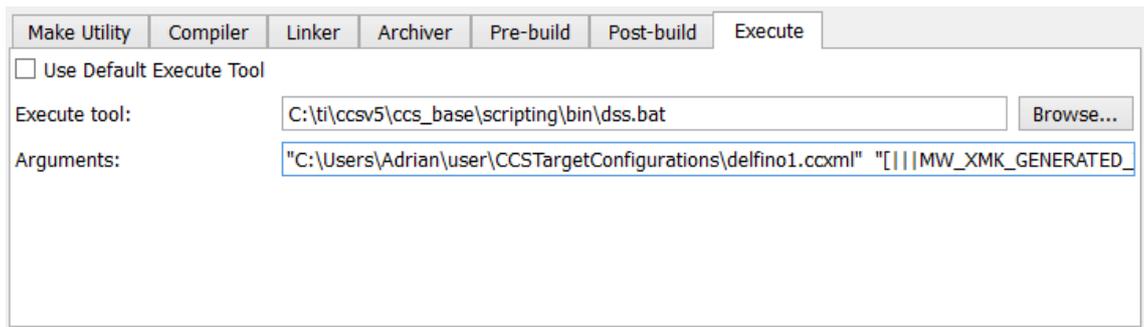


FIGURA 67 ÚLTIMA PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN

Las pestañas “pre-build” y “post-build” pueden quedar por defecto sin configuración adicional.

Si se desea que la programación sea directa sin entrar en el CCSV5 se debe añadir en la pestaña “Execute tool” la aplicación “dss.bat”. El directorio por defecto es el visible en la figura 6 7. El cometido de esta herramienta es ejecutar scripts que permiten realizar acciones adicionales a la compilación del código, en este caso la programación directa del dsp. Se deben añadir los argumentos que darán instrucciones a “dss.bat” .El primer argumento es la dirección de la script que carga el programa.

“C:\runProgram.js”

Por defecto este script se encuentra en el directorio:

“C:\ProgramFiles(x86)\MATLAB\R2013b\toolbox\idmlink\extensions\ticcs\ccsdemos\runProgram.js”

Se han encontrado problemas en la compilación debido a una ruta demasiado larga del archivo, debido a esto se recomienda desplazar el archivo al directorio “C:”. El segundo argumento es el archivo de configuración de la placa, este se crea en el programa CCSV5 como se muestra en la figura 68.

“C:\Users\nombreusuario\user\CCSTargetConfigurations\configuracionplaca.ccxml”

El último argumento indica a la script que programa ha de cargar, en este caso le está indicando que es el programa que acaba de compilar.

“[|||MW_XMK_GENERATED_TARGET_REF[E]|||]”

Los argumentos deben ser escritos tal cual se muestra es decir con las comillas y separados por un espacio, en su defecto puede dar lugar a errores.

Para crear el archivo “configuracion.ccxml” se ejecuta el programa CCSV5, puede encontrarse la opción en el menú principal->file->new->Target Configuration File. La figura 68 muestra la ventana de selección.

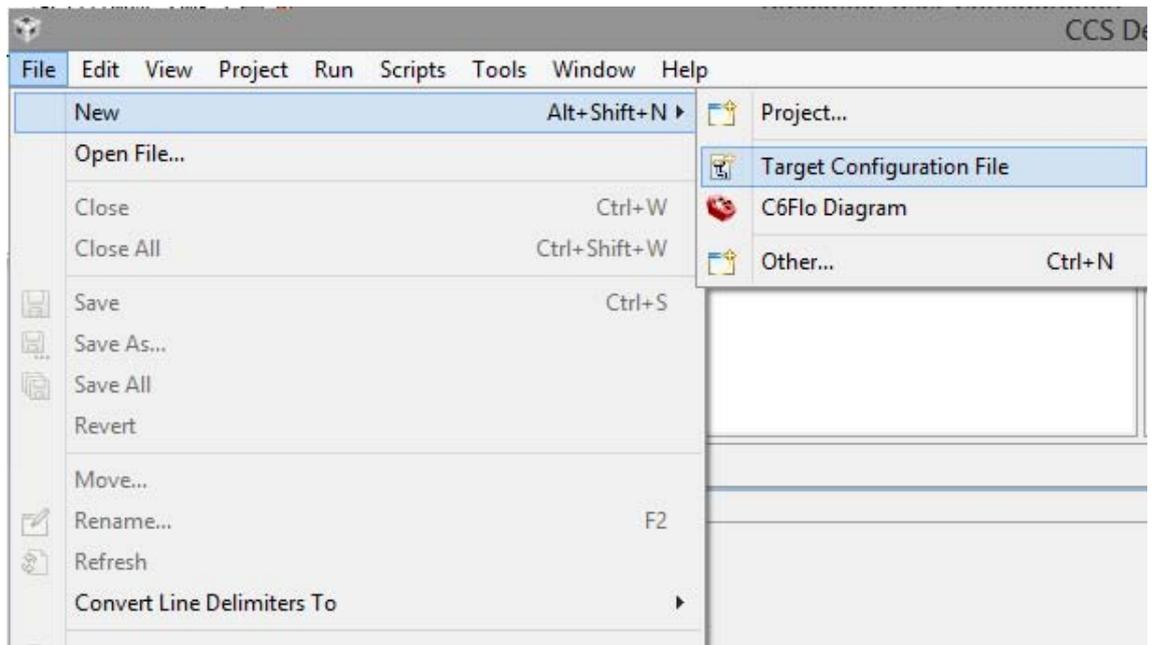


FIGURA 68 VENTANA PARA CREAR UN ARCHIVO “TARGET CONFIGURATION”

El programa abrirá una ventana donde se debe seleccionar, en primer lugar el Emulador correspondiente y a continuación, la placa de prototipos. Seccionar una vez realizado esto la opción guardar., En este caso el emulador es XDS100V1 USB y la placa Experimenter’s kit Delfino f28335 , tal y como se puede observar en la figura 69.

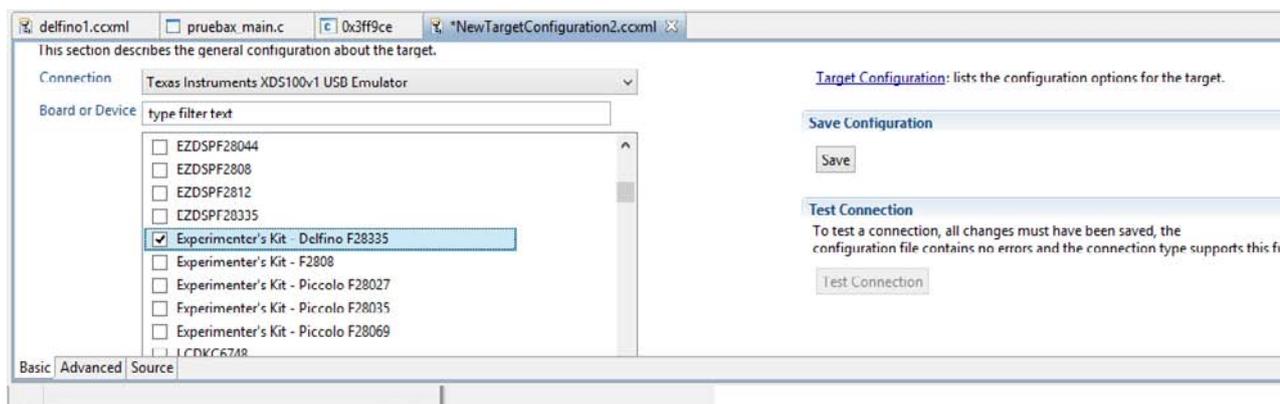


FIGURA 69 CONFIGURACIÓN PARA DELFINO F284335

Posteriormente se puede cerrar la ventana xmakefilesetup. Antes de comenzar con un ejemplo se puede comprobar si se ha configurado correctamente. Para ello, nuevamente en la consola de Matlab, ejecutar el comando: “checkEnvSetup('ccsv5','f28335','check')” .En caso de que la configuración muestre que hay programas no especificados puede que funcione de todas formas .Si se quiere asegurar el correcto funcionamiento, se puede ejecutar el comando: “checkEnvSetup('ccsv5','f28335')” y el programa solicitará uno a uno los directorios que ya se han definido en la ventana “xmakefilesetup”.

A continuación se comprueba la instalación y configuración con un ejemplo de programación implementando el sistema más simple, una salida digital. En la figura 70

se observa la ventana de simulink. El primer paso es abrir la herramienta simulink, crear un nuevo modelo y añadir el bloque de salidas digitales. Añadir un bloque con un valor constante de 1 para accionar la salida.

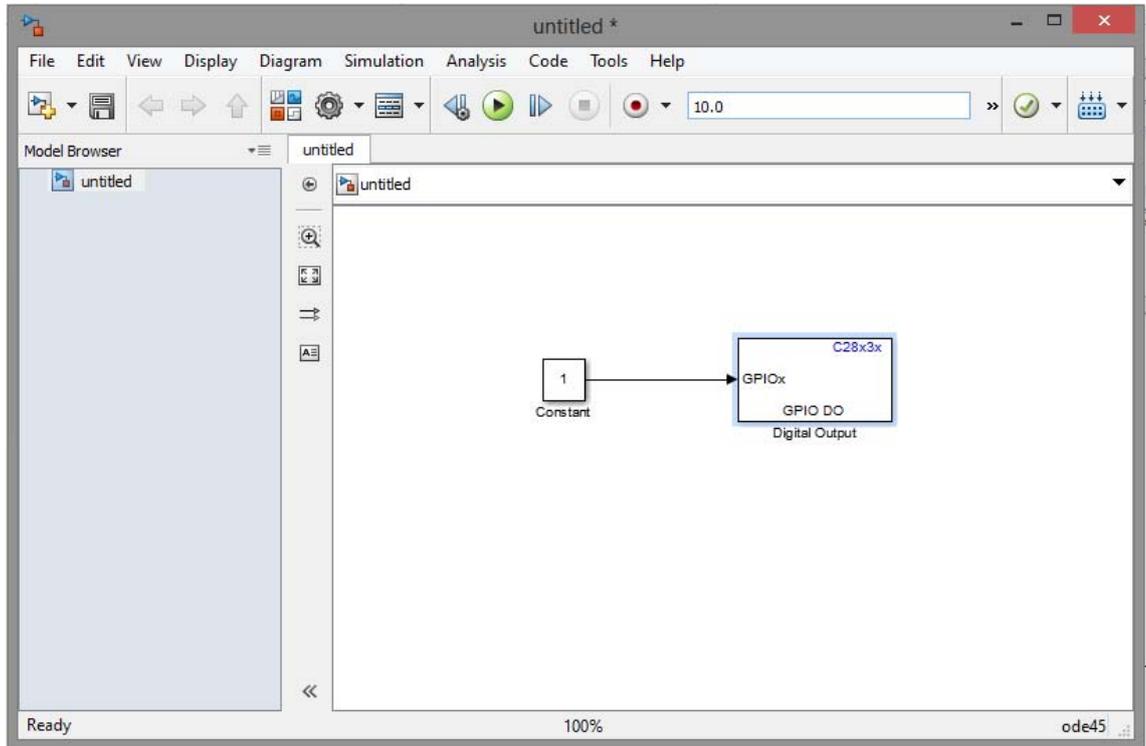


FIGURA 70 MODELO SIMULINK

Para proseguir hay que configurar el modelo, comenzando por la pestaña “simulation” .La opción “model configuration parameters” abre el cuadro de dialogo de la figura 71. Hay que asegurarse de que en las opciones del Solver, el tiempo sea fijo “Fixed-step” y de que el valor sea discreto además de poner un valor.

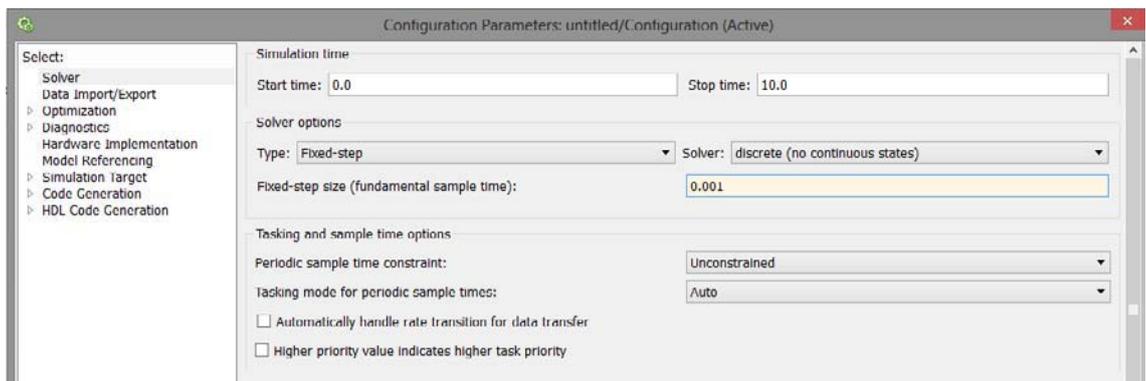


FIGURA 71 SOLVER PARÁMETROS

En la pestaña “Hardware Implementation” escoger la opción “Texas instruments” y “C2000” como en la figura 72.

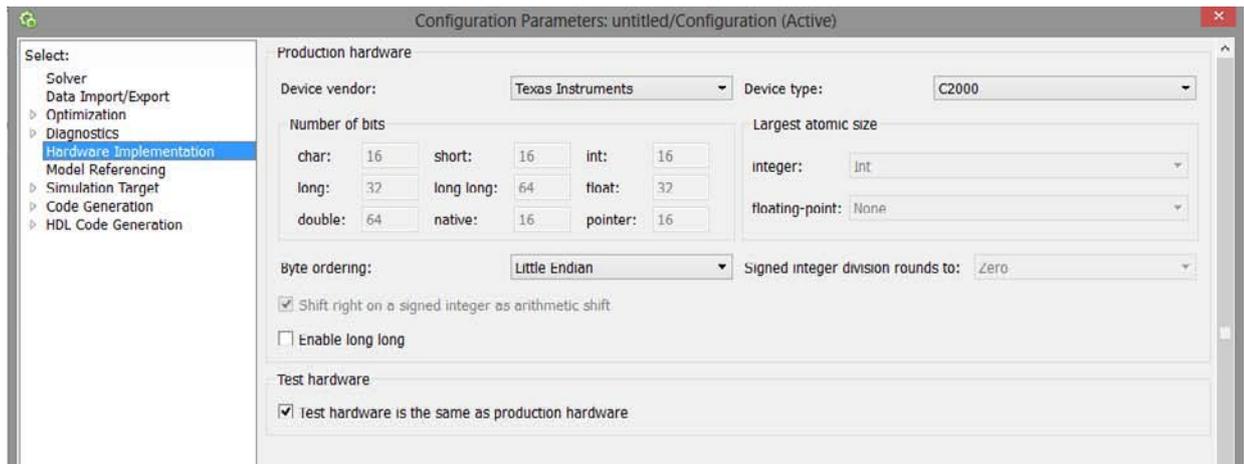


FIGURA 72 PESTAÑA HARDWARE IMPLEMENTATION

La pestaña “Code Generation” de la figura 73, contiene diversos diálogos que se deben configurar. En primer lugar en “System target file” seleccionar la opción “idelink_ert.tlc”. Se puede proseguir con el parámetro “toolchain” donde se debe escoger el programa “Texas Instruments Code Composer Studio V5 (C2000)”

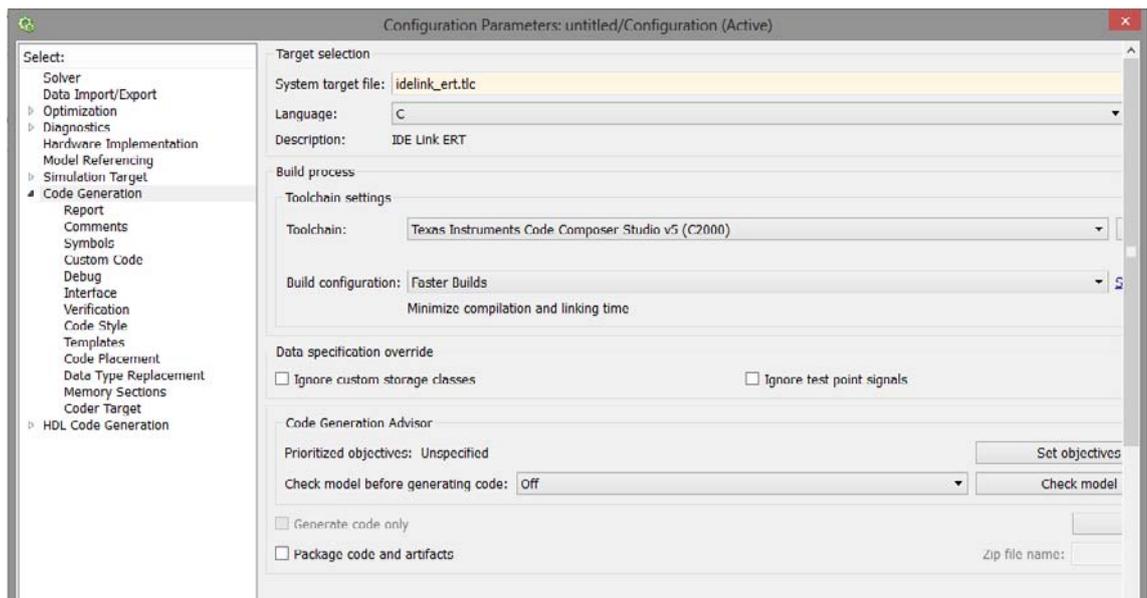


FIGURA 73 CODE GENERATION PESTAÑA PRINCIPAL

Dentro de “Code Generation” se encuentra también el submenú “Coder Target” ,en el cual se configura dentro de la pestaña “Target Hardware Resources” ,la placa que se va a utilizar. No se debe pasar por alto la configuración del parámetro: “IDE/Tool Chain”. Hay que asegurarse de que está marcado el “CCSV5 (makefile generation only)” .La ventana se muestra en la figura 74.Con esto se ha completado la configuración del modelo y se puede compilar, la forma más rápida es teclear control + B.

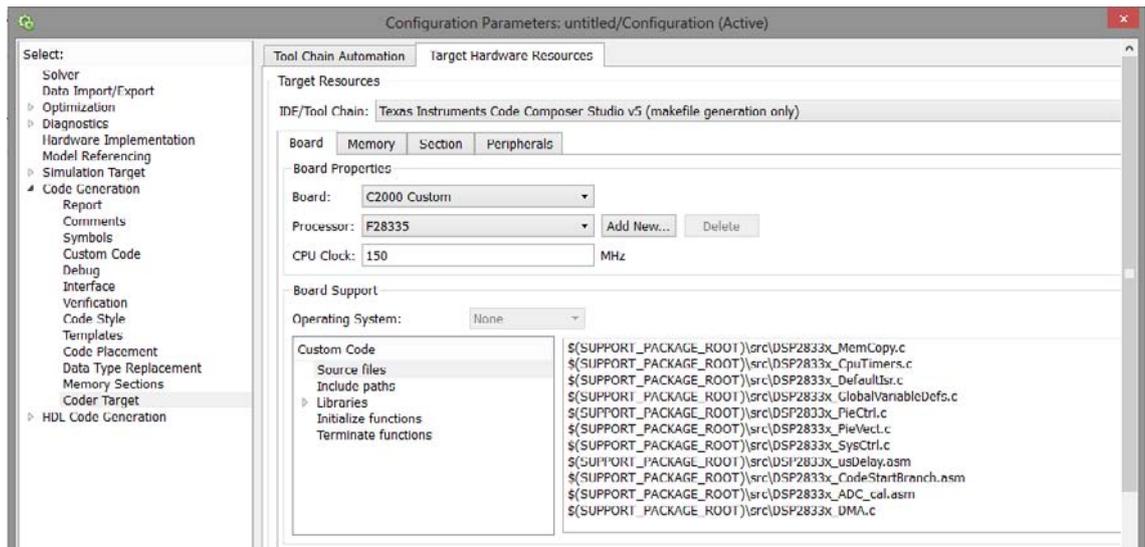
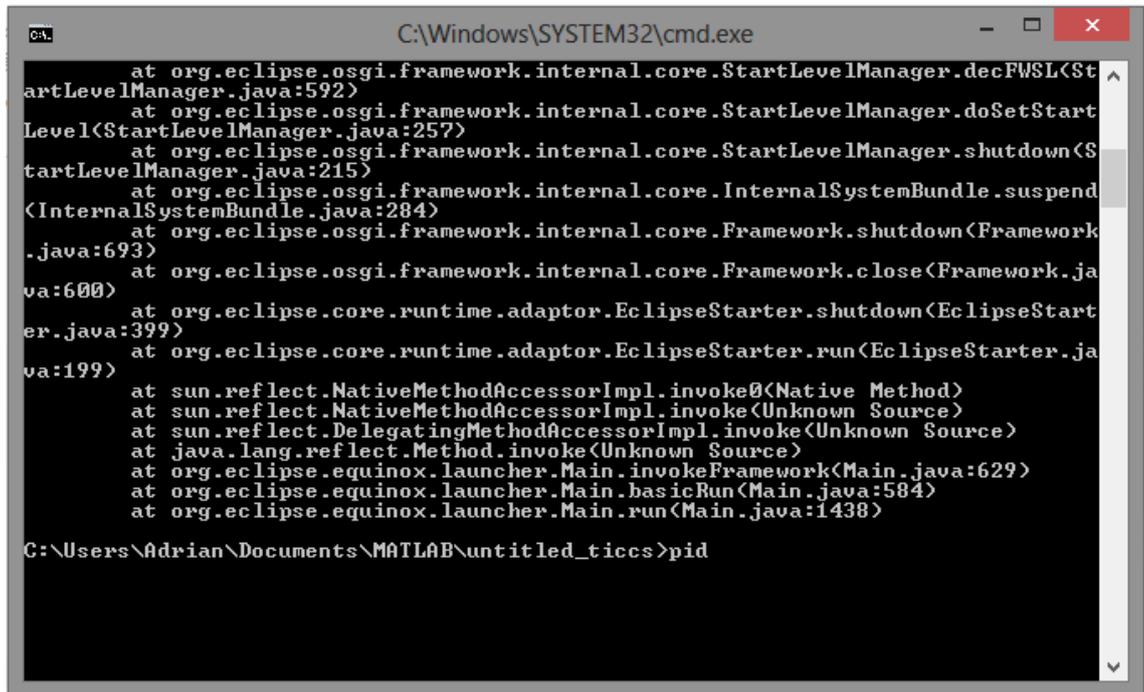


FIGURA 74 TARGET HARDWARE RESOURCES

El resultado deberá ser que, automáticamente se abriera una ventana de comandos “cmd”, indicando la compilación del modelo.

La ventana de comandos muestra como ultima instrucción el directorio donde ha dejado el resultado de la compilación. La figura 75 muestra este resultado. Es en ese directorio en la carpeta CustomMW donde se encuentra el archivo.out, el cual contiene el programa del modelo que programaremos directamente en la DSP con CCSV5 en caso de no haber añadido la herramienta de script en la ventana “xmakefilesetup”.

Si se ha añadido los comandos de scripts, directamente se programara la dsp y tras finalizar la programación la pondrá en modo “run” finalizando el proceso. En caso contrario se continúa con la programación de la dsp en CCSV5.



```
C:\Windows\SYSTEM32\cmd.exe
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.StartLevelManager.decFWSL<StartLevelManager.java:592>
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.StartLevelManager.doSetStartLevel<StartLevelManager.java:257>
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.StartLevelManager.shutdown<StartLevelManager.java:215>
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.InternalSystemBundle.suspend<InternalSystemBundle.java:284>
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.Framework.shutdown<Framework.java:693>
at org.eclipse.osgi.framework.internal.core.Framework.close<Framework.java:600>
at org.eclipse.core.runtime.adaptor.EclipseStarter.shutdown<EclipseStarter.java:399>
at org.eclipse.core.runtime.adaptor.EclipseStarter.run<EclipseStarter.java:199>
at sun.reflect.NativeMethodAccessorImpl.invoke0<Native Method>
at sun.reflect.NativeMethodAccessorImpl.invoke<Unknown Source>
at sun.reflect.DelegatingMethodAccessorImpl.invoke<Unknown Source>
at java.lang.reflect.Method.invoke<Unknown Source>
at org.eclipse.equinox.launcher.Main.invokeFramework<Main.java:629>
at org.eclipse.equinox.launcher.Main.basicRun<Main.java:584>
at org.eclipse.equinox.launcher.Main.run<Main.java:1438>

C:\Users\Adrian\Documents\MATLAB\untitled_ticcs>pid
```

FIGURA 75 VENTANA CMD DE COMPILACIÓN

Los últimos pasos para la programación son todos en CCSV5, se debe comenzar con poner el programa en modo “Debug”.La opción se muestra en la figura 76. .El programa pedirá un archivo de configuración de dispositivo, se puede utilizar el archivo creado anteriormente, “targetconfigurations.ccxml”.

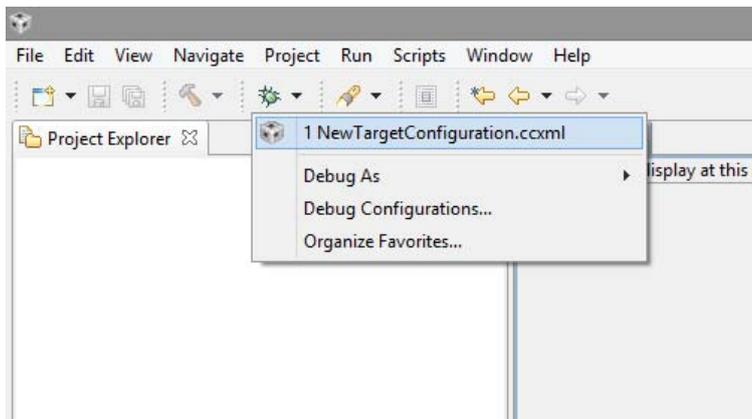


FIGURA 76 MODO DEBUG

A continuación se debe conectar con el dispositivo como muestra la figura 77.

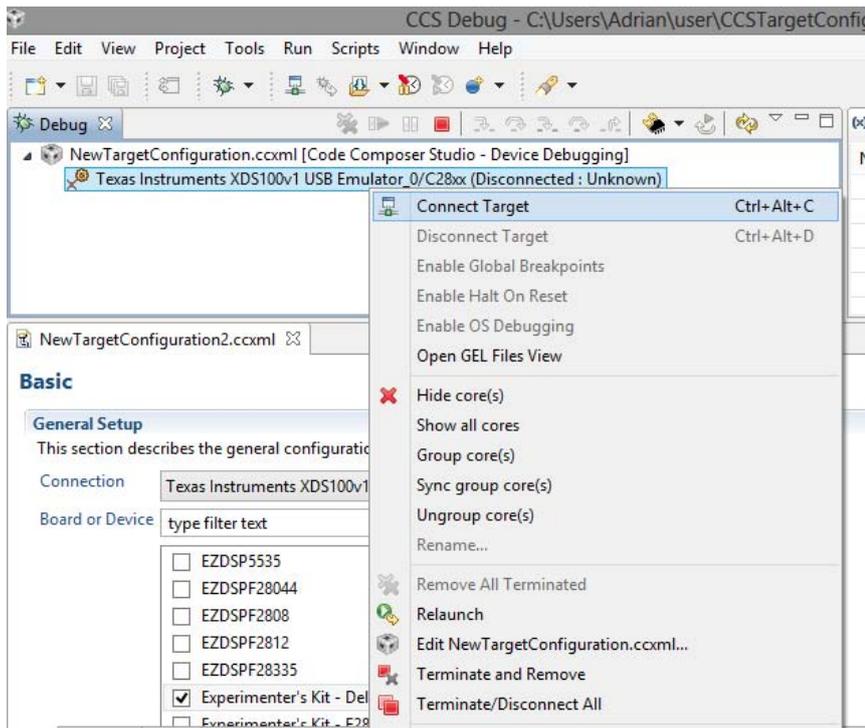


FIGURA 77 CONECTARSE A LA DSP

Para cargar el archivo “.out” en la DSP con la opción “Load Program”. A partir de este momento cada vez que queramos cambiar el programa únicamente se debe compilar en Matlab y seleccionar la opción “Reload Program” en esta misma ventana haciendo el proceso más rápido. Las opciones para cargar el archivo se pueden ver en la figura 78.

Por último simplemente hacer click en Resume o presionar F8 para comenzar la ejecución del programa.

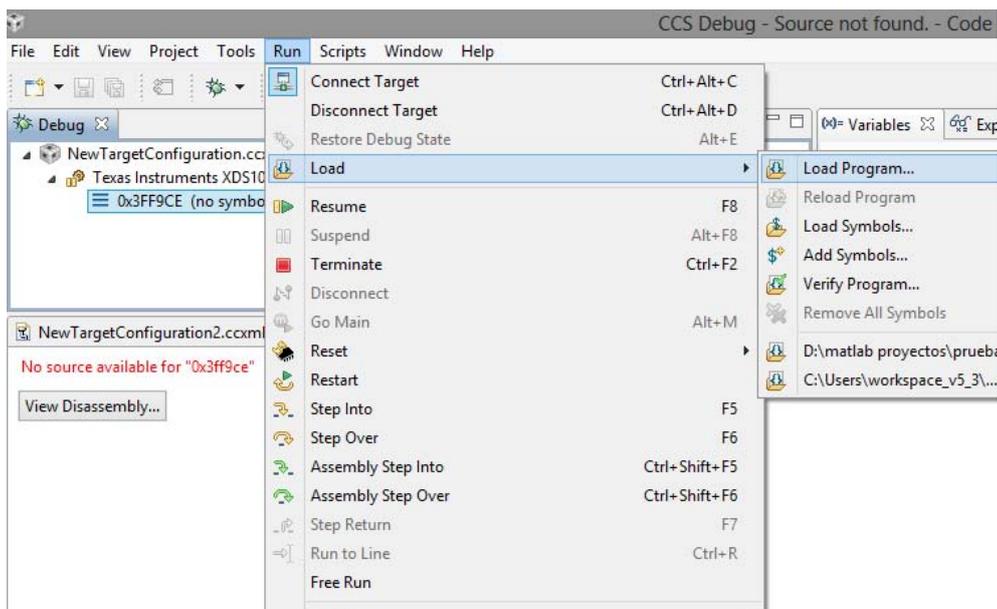


FIGURA 78 OPCIONES PARA CARGAR PROGRAMAS

