



**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**MASTER ENERGÍA: GENERACIÓN, GESTIÓN Y USO EFICIENTE**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN UN  
AEROGENERADOR**

**DOCUMENTO N°1**

**MEMORIA, ANEXO Y PRESUPUESTO**



**PROYECTANTE:  
PRESENTACIÓN:  
TUTOR:**



**JUAN DEL ARCO GARCÍA  
2012  
JESÚS ÁNGEL PISANO ALONSO**

**MEMORIA**



## INDICE MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	2
1.1	Generador de corriente alterna de inducción .....	2
1.2	Características del aerogenerador estudiado, GENERAL ELECTRIC [3] .....	5
1.2.1	Funcionamiento .....	5
2	GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO .....	8
2.1	Modelo creado para la simulación .....	10
2.1.1	Modelado del aerogenerador doblemente alimentado .....	11
2.1.2	Modelado del puente rectificador/inversor.....	14
2.1.3	Rectificador de IGBT's .....	16
2.1.4	Inversor PWM .....	16
2.2	Principio de funcionamiento.....	23
2.3	Circuito equivalente de un generador doblemente alimentado.....	26
2.4	Balance de potencias.....	27
2.4.1	Balance de potencia activa y reactiva según circuito equivalente.....	36
3	ENSAYO DE CORTOCIRCUITO EN EL PARQUE EÓLICO .....	40
3.1	Modelo creado para la simulación.....	42
4	CONCLUSIONES .....	54
4.1	Conclusiones.....	54



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el presente proyecto se desarrolla un modelo de un generador eólico de inducción doblemente alimentado que se utilizará para llevar a cabo un estudio de cortocircuito en un parque eólico. Para la implantación de dicho modelo se utiliza el programa de simulación Simulink de Matlab, partiendo de los datos proporcionados por uno de los fabricantes más habituales de generadores eólicos, General Electric, el modelo se crea de tal forma que la potencia activa generada calculada a través de las simulaciones, en el rango de velocidades del viento en que trabaja el generador real, coincida con la potencia que los generadores entregan a la red.

Esto a su vez también se estudia desde el punto de vista del circuito equivalente, donde se puede comprobar desde un punto de vista más teórico que lo obtenido mediante la simulación es verosímil.

Al ir detallando paso a paso como se va creando el modelo se puede indagar en el funcionamiento de un generador asíncrono. Ya sea en cómo se inyecta la potencia generada en la red, modelado de la red (anexo), en cómo se aprovecha la energía cinética del viento, par y control del paso de pala lo cual se detalla en los anexos, como en el principio de funcionamiento interno de generador doblemente alimentado, modelado del aerogenerador doblemente alimentado, el puente rectificador/inversor y el control de estos convertidores. Así mismo también se realiza un breve estudio de la distorsión armónica que produce este tipo de generadores debido a los convertidores.

Finalmente utilizando dicho modelo se realizará un análisis de cortocircuito, lo cual es el objetivo fundamental del presente proyecto, al que podría verse sometido un parque eólico durante su funcionamiento. Este estudio permite visualizar de una forma rápida y eficaz las alteraciones que un cortocircuito crea en cualquier punto de la red en el que se desee medir, medidas que pueden ser tanto de tensión como de intensidad de la corriente. Dichas medidas podrían resultar muy útiles a la hora de hacer un dimensionado de las protecciones de un parque eólico.

La realización de este proyecto se justifica debido a la importancia que ha adquirido la energía eólica a lo largo de los últimos años en el mundo y más concretamente en territorio nacional. Debido al hecho de que España es un país con unos recursos eólicos excelentes y con una tecnología de aerogeneradores bien desarrollada, la energía del viento es una alternativa clara para la integración de esta forma de energía renovable en la estructura energética española.

## 1.1 Generador de corriente alterna de inducción

La utilización de la máquina asíncrona o de inducción en generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores es actualmente mayoritaria.

En este tipo de máquina eléctrica, el campo magnético giratorio se crea a través del estator, cuyos devanados deberán estar conectados a una fuente exterior de tensión alterna. Esta es la razón básica por la que la máquina asíncrona es consumidora de energía reactiva, ya que al ser el bobinado una carga inductiva, para generar el campo magnético consumirá corriente desfasada de la tensión.

Si partimos de una máquina asíncrona con el rotor en reposo, la acción del campo magnético giratorio sobre las bobinas de rotor induce una fuerza electromotriz en las mismas. Esta fuerza electromotriz inducida motiva el paso de corrientes por las bobinas del rotor, las cuales

normalmente están cerradas en cortocircuito (jaula de ardilla) presentando apenas resistencia. El campo giratorio ejerce fuerzas sobre los conductores recorridos por una corriente eléctrica, originándose un par de giro que pone en movimiento al rotor en el mismo sentido que el campo magnético giratorio. El rotor irá girando cada vez más rápido reduciéndose la diferencia de velocidades de giro entre el campo magnético y el rotor. Al disminuir la diferencia de velocidad, las tensiones inducidas, al igual que las corrientes en el rotor decrecen llegando a ser nulas cuando el rotor alcanza casi la velocidad de rotación del campo giratorio, denominada velocidad de sincronismo.

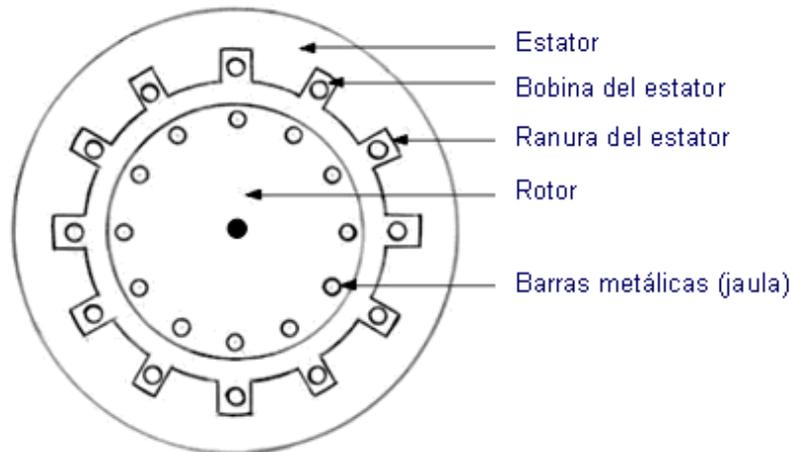


Figura 1 Esquema básico de un motor/generador asíncrono de jaula de ardilla

La velocidad de sincronismo vendrá definida al igual que en las máquinas síncronas por la frecuencia de la señal eléctrica externa y por el número de pares de polos alojados en este caso en el estator. A la diferencia entre la velocidad de giro del campo magnético y del rotor se le denomina deslizamiento ( $S$ ).

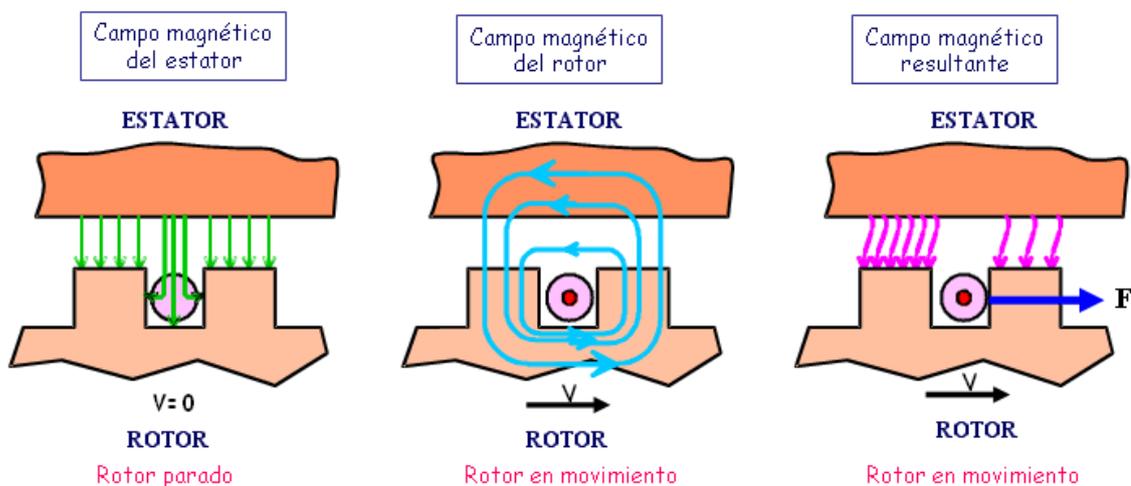
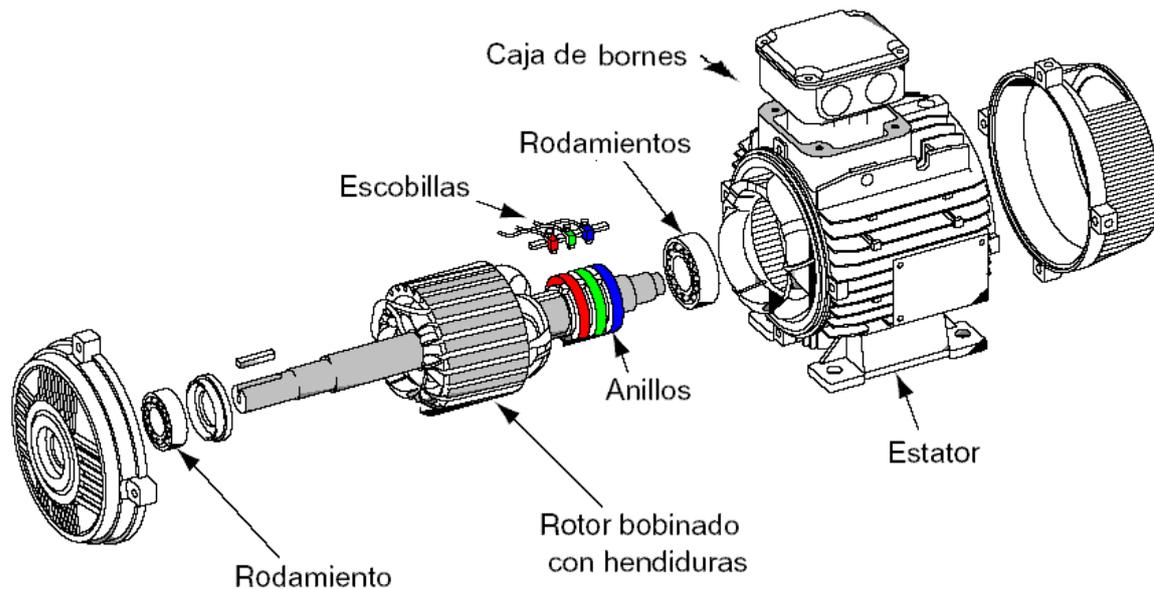


Figura 2 Campo magnético en un motor asíncrono

Hasta este punto se ha descrito el funcionamiento de la máquina asíncrona como motor, ya que se ha utilizado energía eléctrica para mover un rotor.



**Figura 3** Componentes de un motor/generador asíncrono de rotor bobinado

Pero qué ocurre si mediante un aerogenerador acoplado a esta máquina hacemos girar el rotor en el mismo sentido del campo giratorio, a una velocidad superior a la de sincronismo. El deslizamiento cambiará de signo, el sentido de la fuerza electromotriz inducida en la fase del rotor se invierte, al igual que la corriente que ésta determina, ambas tendrán una frecuencia correspondiente a la diferencia de velocidades y la máquina pasará a funcionar como generador, cediendo a la red a la que está conectada la potencia que desarrolla el aerogenerador.

Tal circunstancia, evidentemente, no se da si en la máquina no existe previamente un campo magnético giratorio, lo cual exige que la red suministre a la máquina de inducción la corriente magnetizante que excite el campo magnético. Por ello, el generador asíncrono se define como no autoexcitable.

A medida que aumenta la diferencia de velocidad de giro entre el rotor y el campo magnético producido por el estator, se produce una mayor tensión en el rotor y, consiguientemente crece la corriente que circula por él. Con mayor corriente, el campo magnético debido al rotor también crece y el flujo de potencia activa hacia la red eléctrica será mayor, al igual que el consumo de potencia reactiva por parte de la máquina. Esta tendencia se mantendrá hasta llegar al par resistente máximo del generador.

Dentro de un rango limitado la potencia y el par son proporcionales al deslizamiento, obteniéndose una característica ligeramente inclinada. En este tramo la energía reactiva consumida es capaz de mantener el flujo magnético necesario para que el generador presente un par resistente creciente, pero a partir de un determinado deslizamiento (entre el 5 y el 10%, según la máquina) el incremento de la corriente en el rotor hace que las pérdidas debido a la resistencia del mismo (pérdidas Joule), disminuyan el par resistente y, por lo tanto, se puede producir el embalamiento del rotor. Además, el excesivo aumento de las pérdidas produce un sobrecalentamiento del rotor, que por radiación puede afectar también al estator.

Esto se soluciona con un convertidor de potencia en el circuito principal para poder operar de forma óptima en todo el rango de velocidades de viento.



Si el aerogenerador opera con velocidad de rotación variable, la frecuencia eléctrica del generador varía y por lo tanto puede ser desacoplada de la frecuencia fijada por la red. Esto se realiza mediante un convertidor de frecuencia o cicloconvertidor compuesto por tres etapas.

En la primera etapa, la corriente alterna (c.a.) de frecuencia variable procedente del generador eléctrico es convertida en corriente continua (c.c.). La segunda etapa consiste en una etapa de filtrado que hace que la tercera etapa o inversor se comporte como una fuente de corriente, en la cual la corriente de salida se suaviza mediante una inductancia (bobina), o en el caso de comportarse como una fuente de tensión, las variaciones de la tensión de salida se verán suavizadas mediante una capacidad en paralelo (condensador).

El tamaño de la bobina o del condensador determina la efectividad del desacoplo entre el generador eléctrico y la red. En el caso de utilizar un inversor fuente de corriente, la tercera etapa del convertidor de potencia consiste en un puente de tiristores, que invierte la corriente continua en corriente alterna. En el caso de implementar un inversor fuente de tensión, el puente estará compuesto por dispositivos de conmutación del tipo IGBT (transistor bipolar con puerta aislada). Estos transistores tienen la característica principal de conmutar a altas frecuencias, obteniendo señales sinusoidales de salida casi perfectas, con bajo contenido armónico.

El inversor es capaz de controlar la potencia de salida del generador por ello también la velocidad de rotación del rotor. Midiendo la velocidad del viento y la velocidad de rotación del generador, se puede controlar el aerogenerador de forma que opere en el máximo valor del coeficiente de potencia  $C_p$ , de esta manera se puede extraer la máxima potencia en todas las condiciones de velocidad del viento

## 1.2 Características del aerogenerador estudiado, GENERAL ELECTRIC [3]

A continuación se muestran las características del aerogenerador escogido para llevar a cabo la simulación, estas características están disponibles en los catálogos que el propio fabricante facilita a través de su página web.

Modelo	GEWE 1,5 SE	
Potencia [kW]	1500	
Tecnología	DFIG	
Rotor	Diámetro [m]	70.5
	Área de barrido [m <sup>2</sup> ]	3904
	Velocidad de giro [rpm]	(11,1-22,2)
Palas	Número	3
	Longitud [m]	34,5
	Perfil	DU+FFA-W3
Multiplicadora	Relación de transmisión	(1:83)
	Refrigeración [kW]	2.2
Generador	Tipo	Doble alimentado
	Potencia [kW]	1500
	Tensión [V]	690
	Frecuencia [Hz]	50

Tabla 1 Características generador GEWE 1,5 MW

### 1.2.1 Funcionamiento

Un dato muy interesante que facilita el fabricante son las velocidades de conexión y desconexión que tiene la máquina esto se hace bien por operatividad o por seguridad, así, en la Tabla 2 se puede



ver que la conexión se produce con una velocidad del viento de 4 m/s, y la desconexión se produce a partir de los 25 m/s después de que el sistema obtenga, en un tiempo de 600 segundos, un promedio de velocidad del viento mayor o igual que 25 m/s, lo mismo ocurre con velocidades superiores para las cuales los tiempos de respuesta del sistema son menores.

Velocidad del viento de corte-conexión	4 m/s
Velocidad del viento promediada 600s de corte-desconexión	25 m/s
Velocidad del viento promediada 30s de corte-desconexión	IEC I: 28 m/s
Velocidad del viento promediada 3s de corte-desconexión	IEC I: 30 m/s
Velocidad del viento promediada 300s de corte-reconexión	IEC I: 22 m/s

Tabla 2 Conexión/Desconexión GEWE 1,5 MW

El fabricante del aerogenerador objeto de estudio, General Electric, también facilita información de la potencia activa que genera este modelo de aerogenerador según la velocidad del viento, lo dicho para el generador anterior vale así mismo para este.

Velocidad	Potencia [kW]	Velocidad	Potencia [kW]
		13	1500
4	45	14	1500
5	110	15	1500
6	230	16	1500
7	400	17	1500
8	610	18	1500
9	890	19	1500
10	1190	20	1500
11	1430	21	1500
12	1500	22	1500

Tabla 3 Velocidad/Potencia generador GEWE 1,5 MW

De esta tabla es posible sacar la curva característica de la potencia en función de la velocidad del viento.

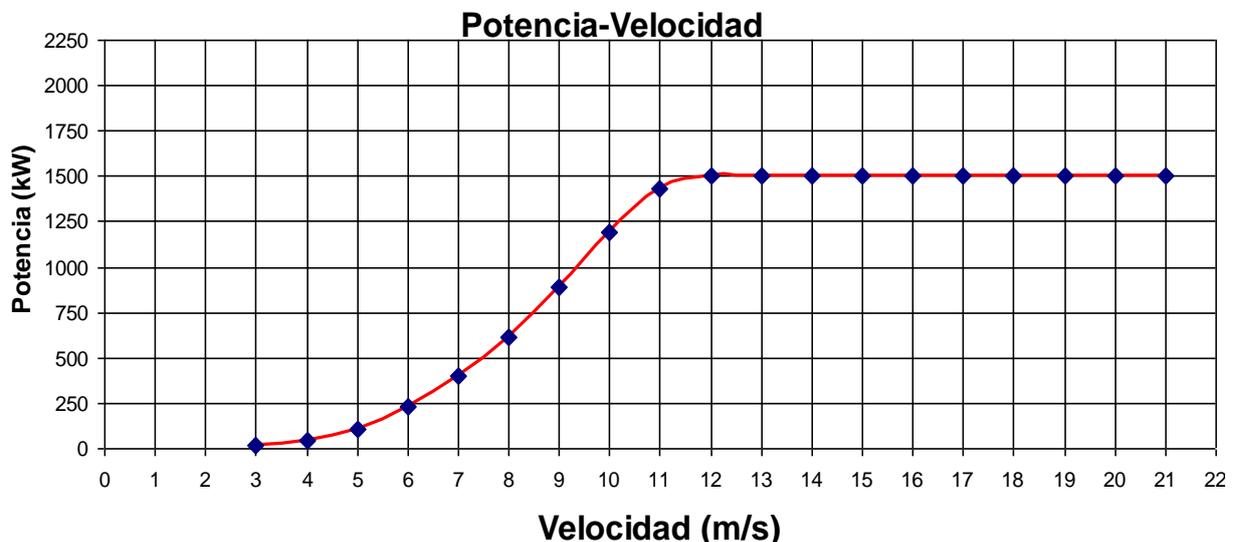


Figura 4 Velocidad/Potencia generador GEWE 1,5 MW



Mediante la siguiente ecuación se puede obtener la curva par/velocidad del rotor:

$$\text{Ec. 1} \quad T_{\text{máquina}} = \frac{3 \cdot \frac{R_r}{n_s - n_r} \cdot \left(\frac{690}{\sqrt{3}}\right)^2}{n_s} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \left[ \left( R_s + \frac{R_r}{\frac{n_s - n_r}{n_s}} \right)^2 + (X L_s + X L_r)^2 \right]$$

GEWE 1,5 SE

Potencia nominal	Pnom=1.5e6/0.9 [VA]
Tensión de línea	Vnom=690 [V]
Frecuencia nominal	Fnom=50 [Hz]
Resistencia en el estator	Rs=0.00706 [pu]
Inductancia en el estator	Lls=0.171 [pu]
Resistencia en el rotor	Rr=0.005 [pu]
Inductancia en el rotor	Llr=0.156 [pu]
Inductancia mutua	Lm=2.45 [pu]
Constante de inercia	H=4.65 s
Factor de fricción	F=0.0001 [pu]
Número de pares de polos	p=2

Tabla 4 Parámetros del generador GEWE 1,5 MW

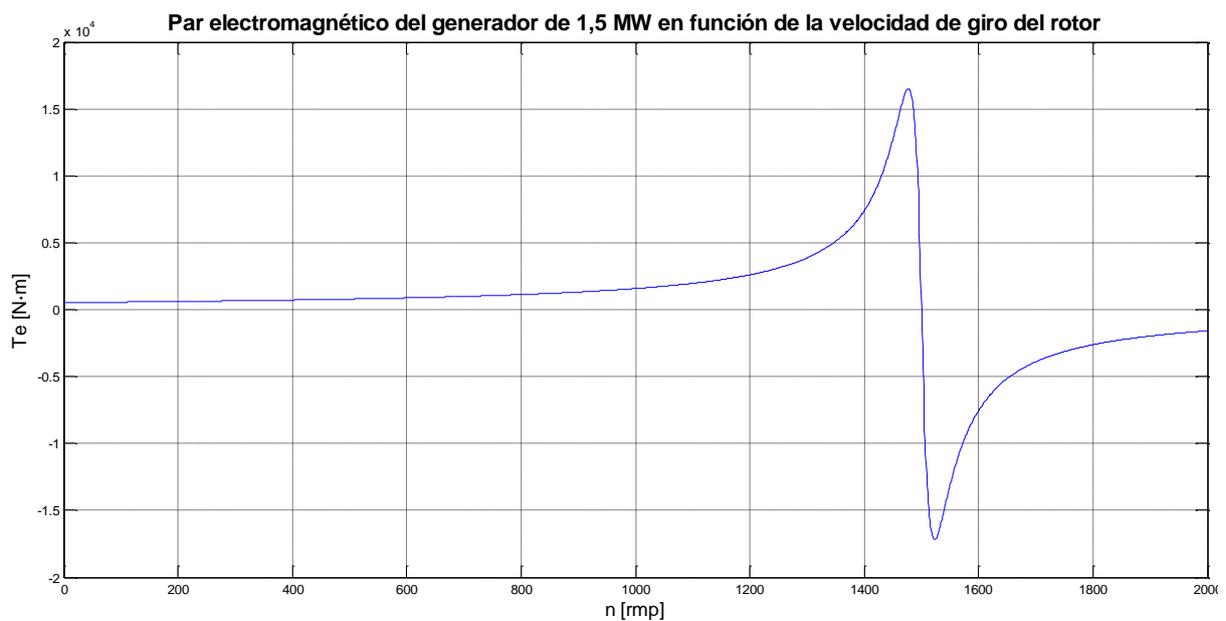


Figura 5 Curva Par/V.rotor del generador GEWE 1,5 MW



## 2 GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO

La operación de este tipo de aerogeneradores tiene como objetivo la generación de la máxima potencia, esto se denomina seguimiento del punto de máxima potencia.

Para velocidades del viento mayores que la nominal, la captura energética de la turbina debe limitarse, del modo que se realiza en el presente proyecto, en sistemas de velocidad variable, por medio del control de paso de pala.

Una solución que permite la operación a velocidad variable de la turbina, permaneciendo constante la velocidad del generador, consiste en una transmisión mecánica donde el eje de salida gira a velocidad constante, mientras que el eje de entrada gira a velocidad variable. Estos equipos se han venido utilizando en generadores para la industria aeronáutica durante años.

No obstante la solución más adecuada para la operación a velocidad variable de las turbinas eólicas consiste en el empleo de un convertidor de frecuencia entre el generador eléctrico y la red, dado que la operación a velocidad variable de las turbinas eólicas requiere la operación a velocidad variable del generador conectado a una red de frecuencia constante.

La evolución de los semiconductores de potencia, capaces hoy en día de manejar mayores potencias, con mayor rapidez y con menores costes, ha contribuido enormemente al desarrollo de los sistemas eólicos de velocidad variable. Lo mismo cabría decir de los microcontroladores utilizados en los equipos de control. Estos elementos de potencia y control son los componentes fundamentales de un cambiador de frecuencia.

La operación a velocidad variable de un aerogenerador es independiente del tipo de generador empleado, ya que está basada en un control del par de la máquina eléctrica; siendo el control del par del generador el que depende del tipo de máquina y de convertidor utilizado. Así en el presente proyecto el control del par se realiza variando la componente transversal de la corriente rotórica en un sistema de referencia ligado al flujo total estático.

La estrategia de control para el seguimiento del punto de máxima potencia se basa en obtener la velocidad de giro óptima. Para ello el regulador de velocidad ajustará una referencia de par para el sistema de control de par del generador. Cuando el par generado sea igual al par de la turbina se alcanzará el equilibrio a la velocidad establecida. La aceleración o deceleración hasta nuevos valores de velocidad de consigna se alcanzará disminuyendo o aumentando, respectivamente, el par del generador eléctrico.

Un generador asíncrono de rotor bobinado puede generar una tensión de valor eficaz y frecuencia constante aunque su eje gire a velocidad variable. Para ello se alimenta el rotor de la máquina con un convertidor de frecuencia compuesto por dos convertidores electrónicos CA/CC reversibles. Con el convertidor conectado al rotor del generador se puede regular la amplitud, frecuencia y fase de la tensión aplicada al rotor, lo cual permite realizar un control vectorial de la máquina para regular el par electromagnético y el factor de potencia del generador en un amplio margen de velocidades de giro, tanto por encima como por debajo de la velocidad de sincronismo. De forma semejante, el control vectorial del convertidor conectado a la red hace que sea posible realizar una regulación independiente de las potencias activa y reactiva, apartado que se estudiará con detalle en el presente proyecto, y que permite extraer o inyectar la potencia activa generada en el rotor de la máquina y controlar la potencia reactiva intercambiada entre el convertidor y la red.



La capacidad de regulación de los sistemas de generación que aplican esta tecnología, permite conseguir un control de la energía inyectada a la red similar al obtenido con los generadores síncronos convencionales con la ventaja de que la velocidad de giro de la máquina puede variar en un amplio margen, tanto por encima como por debajo de la velocidad de sincronismo. Además, la potencia del convertidor electrónico necesario es reducida, entre un 20 y un 30% de la potencia del generador. Por estas razones, este sistema constituye una solución muy atractiva para ser utilizada en aerogeneradores de velocidad variable y la mayor parte de las casas comerciales disponen de este tipo de tecnología.

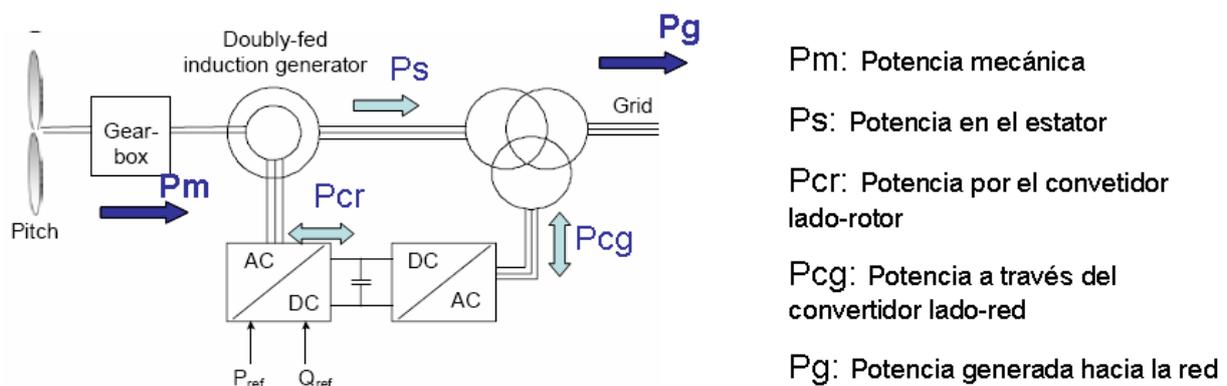
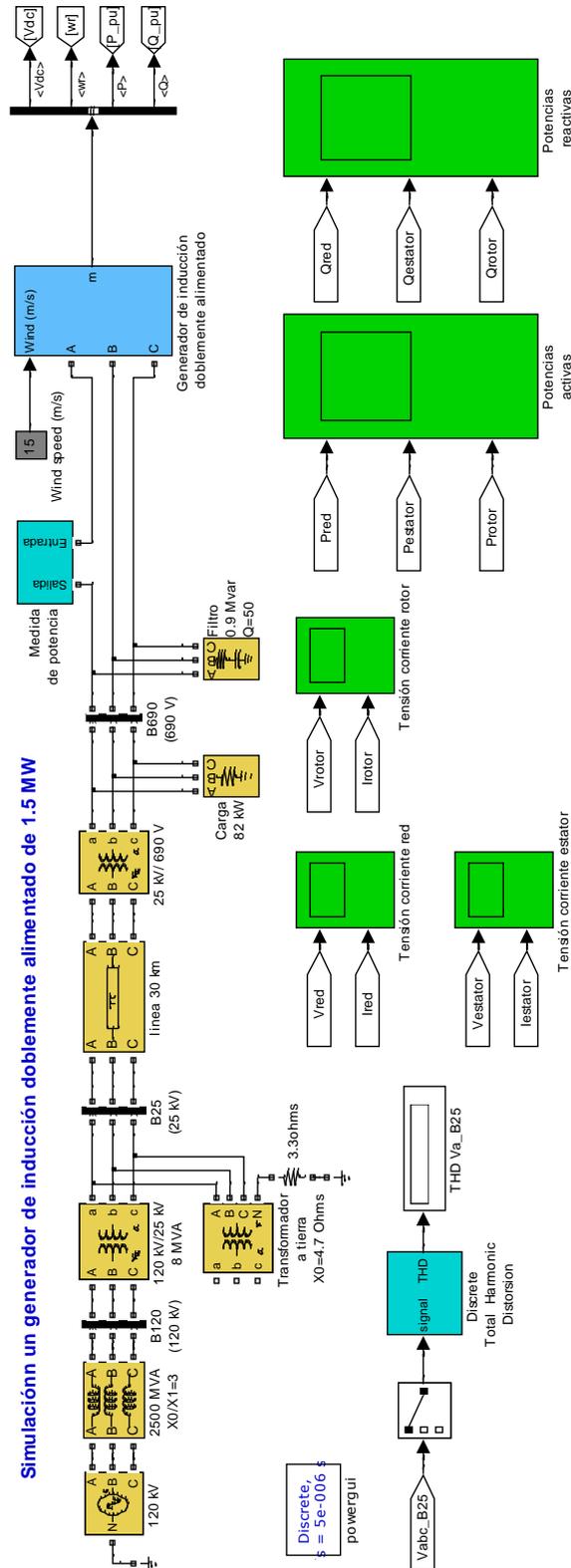


Figura 6 [5] Topología típica del generador doblemente alimentado

## 2.1 Modelo creado para la simulación

El proceso de modelado de la red se explica en el punto 1 del Anexo.



**Figura 7 Modelo doblemente alimentado**



### 2.1.1 Modelado del aerogenerador doblemente alimentado

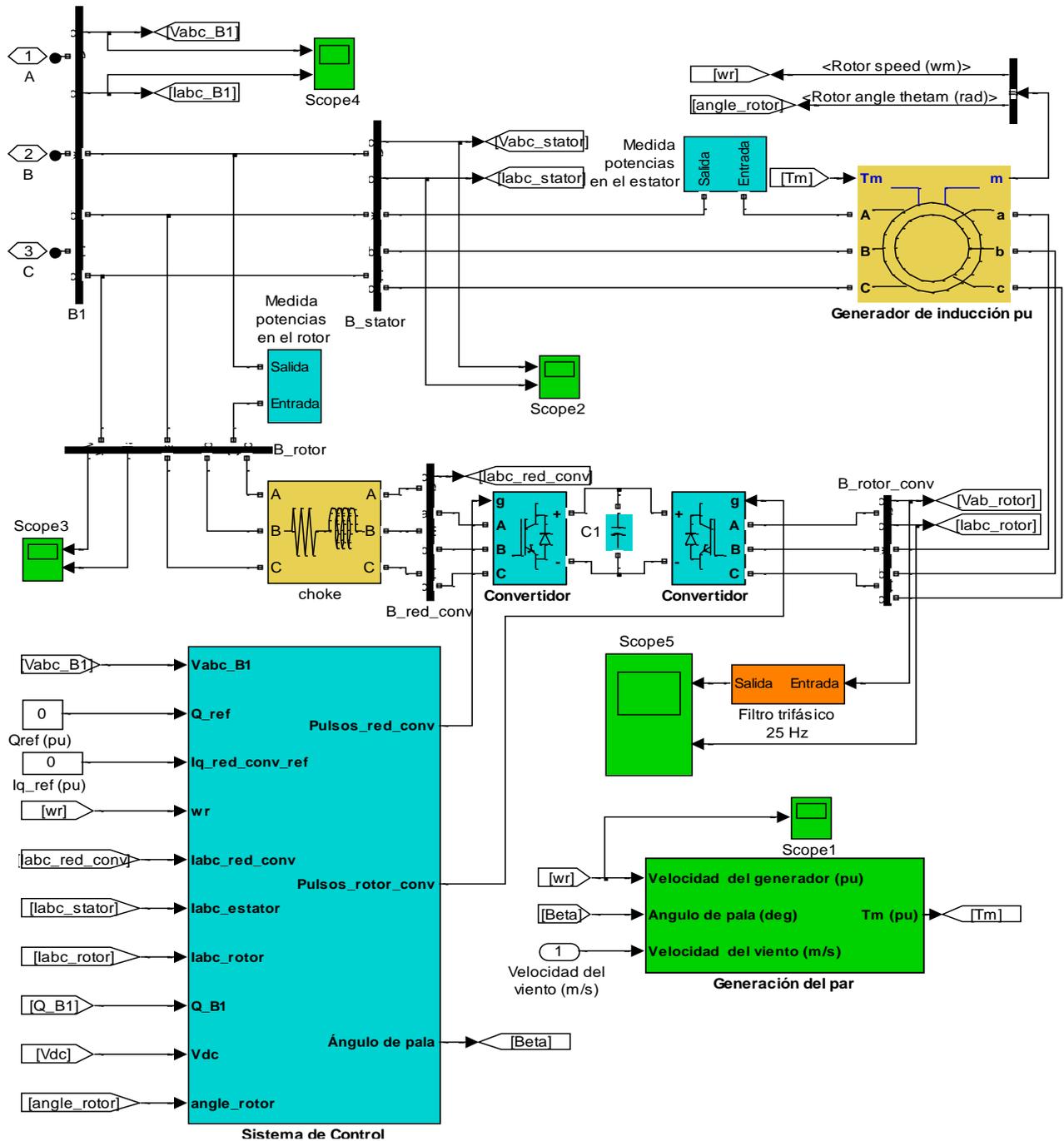


Figura 8 Modelado del aerogenerador doblemente alimentado

En la Figura 8 se puede ver el subsistema que representa el aerogenerador doblemente alimentado, sus controles, así como el bloque que genera la señal de entrada de par al generador, la explicación de cómo se crea este bloque esta en el punto 2 del Anexo. Se comentarán los bloques y los distintos puntos más relevantes de este apartado, dejando de lado el bloque que se encarga del control, que se explica en el punto 4 del Anexo, debido a que es complejo y explicarlo ocuparía una extensión demasiado grande de la memoria.

En primer lugar se hará referencia al bloque que representa al generador asíncrono propiamente dicho. Como se ve en la Figura 9 se trata de un generador de inducción con los bornes del rotor accesibles; lo cual es indispensable para poder tener la doble alimentación. Como se puede ver la única entrada que se tiene al rotor es la del par ( $T_m$ ) y como salidas se utilizarán la velocidad del rotor así como su ángulo, es decir, la posición del rotor, que servirán como datos de entrada para el control así como para la generación del par.

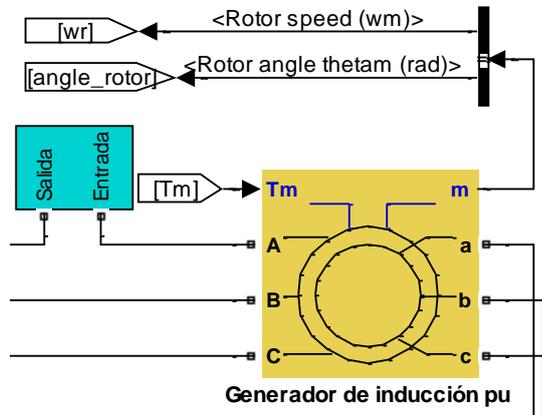
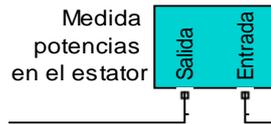


Figura 9 Generador doblemente alimentado

Preset model:	No
Mechanical input:	Torque $T_m$
<input checked="" type="checkbox"/> Show detailed parameters	
Rotor type:	Wound
Reference frame:	Stationary
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz) ]:	[ Pnom Vnom Fnom ]
Stator resistance and inductance [ Rs,Lls ] (pu):	[ Rs Lls ]
Rotor resistance and inductance [ Rr',Llr' ] (pu):	[ Rr Llr ]
Mutual inductance Lm (pu):	Lm
Inertia constant, friction factor and pole pairs [ H(s) F(pu) p() ]:	[ H F p ]
Initial conditions	[ -0.1 0 0 0 0 0 ]

Figura 10 Implementación de los parámetros en el modelo

Se tiene en dos ocasiones el siguiente bloque, Figura 11, que mide las potencias activa y reactiva que ya se ha explicado anteriormente, cada uno mide respectivamente las potencias en bornes del rotor y del estator.

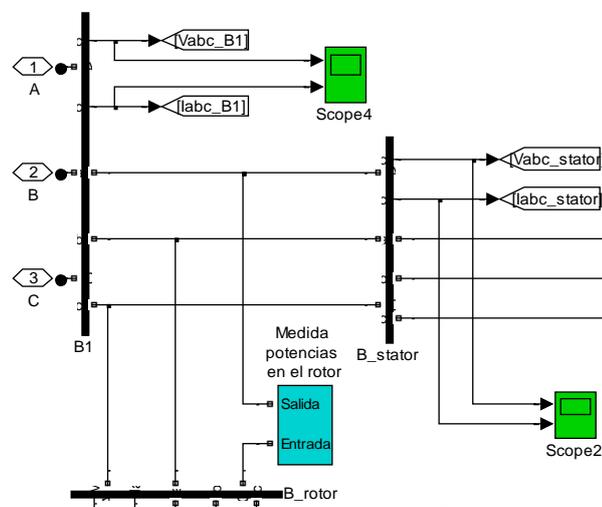

**Figura 11 Bloque de medida de potencias activas y reactivas**

Se recuerda ahora los parámetros internos del generador que ya se vieron en capítulos anteriores y como se implementan en el modelo, Figura 10:

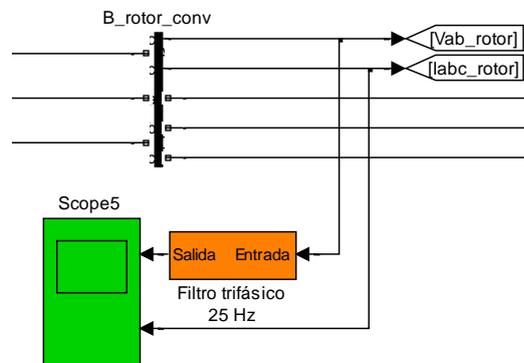
Potencia nominal	$P_{nom}=1.5e6/0.9$ [VA]
Tensión de línea	$V_{nom}=690$ [V]
Frecuencia nominal	$F_{nom}=50$ [Hz]
Resistencia en el estator	$R_s=0.00706$ [pu]
Inductancia en el estator	$L_{ls}=0.171$ [pu]
Resistencia en el rotor	$R_r=0.005$ [pu]
Inductancia en el rotor	$L_{lr}=0.156$ [pu]
Inductancia mutua	$L_m=2.45$ [pu]
Constante de inercia	$H=4.65$ s
Factor de fricción	$F=0.0001$ [pu]
Número de pares de polos	$p=2$

**Tabla 5 Características del generador GEWE 1,5 MW**

Destaca también el nudo dónde se conectan tanto el rotor como el estator para transferir la potencia hacia la red, si bien en el caso del rotor también es posible que absorba energía de la red. En este nudo además se toman las señales trifásicas de las tensiones y corrientes tanto de la red como del rotor y del estator a través de los tres buses de datos que se ven en la Figura 12, estas señales permiten conocer de las tensiones y corrientes los valores eficaces, tomados en medidas por unidad, conocer sus desfases, calcular frecuencias, así como hacer un seguimiento de la evolución de las señales y apreciar los distintos fenómenos que se producen. Huelga decir, que las tensiones medidas son de fase.

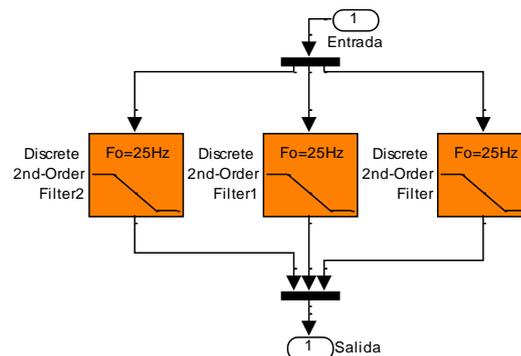

**Figura 12 Nudo de confluencia de red, estator y rotor**

A continuación se prestará atención a la conexión al rotor, Figura 13, después de salir del inversor PWM las tres fases se conectan directamente al rotor, aquí es necesario tomar medidas tanto de la tensión como de la corriente que servirán para posteriores análisis, a parte de los valores eficaces de la tensión y corriente y la frecuencia también es necesario sacar el desfase entre la tensión y la corriente. Al salir del bus se tiene la tensión de alimentación del rotor que es una señal PWM modulada, esta señal de tensión contiene los distintos pulsos típicos de este tipo de señales y de las cuales es imposible calcular el desfase entre tensión y corriente sin filtrar previamente la señal, por ello se construye un filtro trifásico pasa-bajos cuya frecuencia puede variarse dependiendo de la frecuencia con la que se esté alimentando al rotor en ese momento.



**Figura 13** Medida de la señal de tensión y corriente del rotor filtrada

Para llevar a cabo este filtrado se toma la señal de la tensión a partir del bus (B\_rotor\_conv), esta línea realmente lleva la señal de las tres fases por lo que es necesario desmultiplexarla para filtrar cada fase individualmente. Una vez hecho esto se vuelve a multiplexar y se conecta la salida a un osciloscopio en el que también se tiene la señal trifásica de la corriente pudiendo así calcular el desfase entre estas señales.



**Figura 14** Filtro de la señal del rotor

### 2.1.2 Modelado del puente rectificador/inversor

Un elemento muy importante en un generador doblemente alimentado es el puente de convertidores, Figura 16. Consta de dos convertidores reversibles CA/CC-CC/CA que permiten el flujo de potencia en ambos sentidos. Un rectificador de IGBT's (convertidor lado de la red) así como de un inversor PWM (modulación de anchura de pulso, convertidor lado del rotor). La información que se obtiene del bus del lado de la red (B\_red\_conv) es la señal de la corriente trifásica, que servirá como entrada al sistema de control. El sistema de control será el encargado de establecer los pulsos de disparo por puerta (g) que ponen en conducción a los transistores que constituyen los puentes.

Es decir, para velocidades del rotor supersíncrona  $P_r$  fluye hacia el convertidor almacenándose la energía en el condensador de acople entre ambos convertidores (aumentando la tensión  $V_{DC}$ ), y para velocidades del rotor inferiores a la de sincronismo,  $P_r$  será extraída del condensador disminuyéndose la tensión  $V_{DC}$ . El convertidor del lado de la red se usará para generar o absorber la potencia  $P_{gc}$  de manera que se mantiene constante la tensión en el condensador  $V_{DC}$ . En régimen permanente (despreciando las pérdidas en los convertidores),  $P_{gc} = P_r$  y la velocidad de la turbina es determinada por la potencia absorbida o consumida por el convertidor del lado del rotor. Los convertidores del lado rotor y del lado máquina tienen la capacidad de generar o absorber potencia reactiva y deben ser usados para el control de la potencia reactiva y la tensión en terminales de la red.

El convertidor del lado del rotor es usado para controlar la potencia de salida de la turbina de viento y la tensión medida en terminales de la red (o potencia reactiva).

El convertidor del lado de la red es usado para controlar la tensión  $V_{DC}$  del condensador de enlace entre ambos convertidores. Además, es posible usar este convertidor para generar o absorber potencia reactiva.

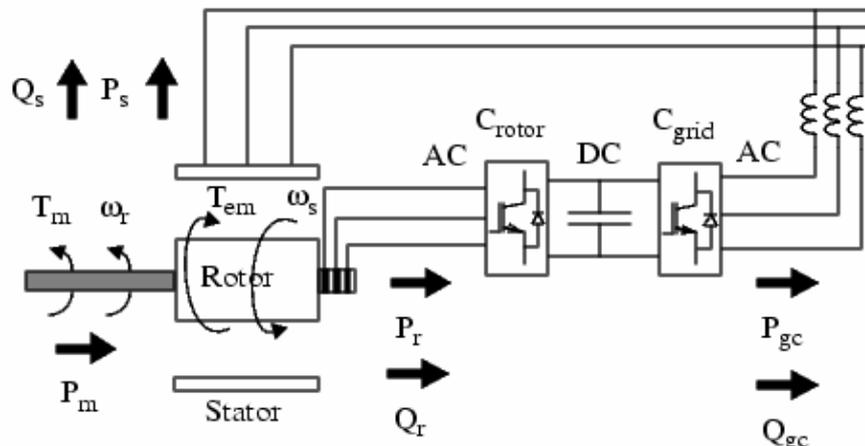


Figura 15 [5] Topología y parámetros en el doblemente alimentado

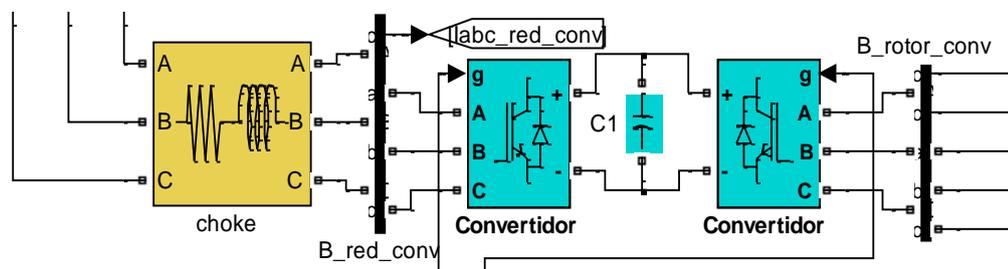


Figura 16 Modelado del puente rectificador inversor

En la siguiente imagen se puede ver la topología de este puente de convertidores y las entradas de datos a las puertas.

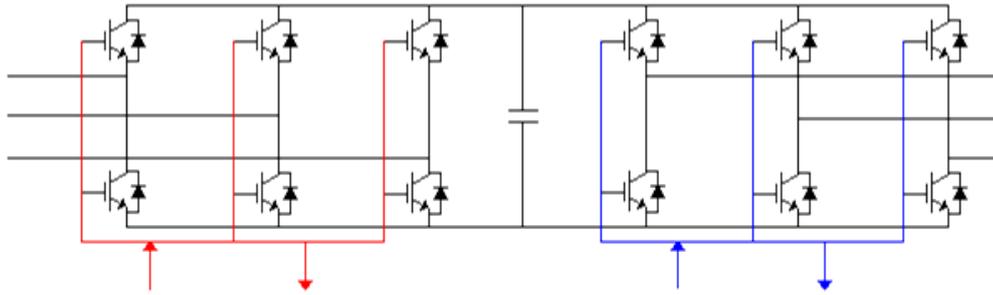


Figura 17 Topología del puente rectificador inversor

### 2.1.3 Rectificador de IGBT's

El funcionamiento de este rectificador es semejante en todo al inversor PWM. En función de las señales de disparo aplicadas a la puerta de los semiconductores el inversor sintetiza un tren de pulsos en su etapa de corriente alterna. La diferencia entre el primer armónico de la onda de tensión en el convertidor y la f.e.m. del generador aplicada a la inductancia de filtrado de choque (choke) da origen a la componente fundamental de la corriente. Es decir, se puede controlar a voluntad, en amplitud, fase y frecuencia, el primer armónico de la tensión del convertidor, lo que permite un control del módulo y la fase de la intensidad en la etapa de corriente alterna demandada por el bloque rectificador desde la red.

Si la onda de tensión del convertidor adelanta a la onda de f.e.m. del generador la potencia activa (P) circula desde la red al convertidor, la potencia es saliente del convertidor. La potencia reactiva (Q) depende de la diferencia entre el módulo de las tensiones: si el módulo de la f.e.m. de la red es mayor que el de la tensión del convertidor, la potencia reactiva va de la red al convertidor, mientras que en caso contrario el convertidor genera potencia reactiva. Como se puede observar el control de potencia activa es independiente del control de la potencia reactiva, lo cual permite trabajar en los cuatro cuadrantes de un plano P-Q.

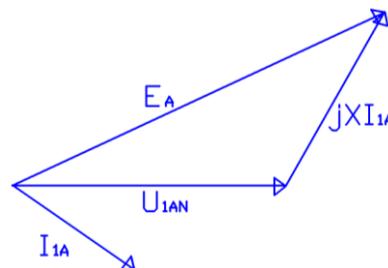


Figura 18 Diagrama vectorial

### 2.1.4 Inversor PWM

Su funcionamiento es similar al del rectificador de IGBT's solo que su función es la contraria al convertir las magnitudes de continua en magnitudes de alterna permitiendo controlar el factor de potencia a voluntad. Gracias a las técnicas de modulación del ancho de pulso los armónicos de orden bajo son eliminados y los de mayor amplitud pasan a tener frecuencias del orden de la de conmutación del inversor, por lo que resultan fácilmente filtrados por las inductancias del propio circuito rotórico. Esto conduce a una importante reducción del tamaño del filtro que se ha de conectar a la salida respecto al empleado en los inversores conmutados por red.

Se pueden ver en la Figura 19 los parámetros introducidos tanto en el rectificador como en el inversor ya que son idénticos.

Number of bridge arms:	3
Snubber resistance $R_s$ (Ohms)	1e5
Snubber capacitance $C_s$ (F)	inf
Power Electronic device	IGBT / Diodes
Ron (Ohms)	1e-4
Forward voltages [ Device $V_f$ (V) , Diode $V_{fd}$ (V)]	[ 0 0 ]
[ $T_f$ (s) , $T_t$ (s) ]	[ 0 , 0 ]

**Figura 19** Implementación de los parámetros del rectificador y del inversor

Se pueden ver en la Figura 20 los parámetros introducidos en la inductancia de filtrado de choque (choke) que está formada por una resistencia y una inductancia en serie,  $R_{RL}=0,003$  pu y  $L_{RL}=0,3$  pu. El resto de valores se pueden ver en la Tabla 5, en páginas anteriores.

Branch type	RL
Resistance R (Ohms):	$R_{RL} \cdot V_{nom}^2 / P_{nom}$
Inductance L (H):	$L_{RL} \cdot V_{nom}^2 / P_{nom} / (2 \cdot \pi \cdot F_{nom})$

**Figura 20** Implementación de los parámetros de la inductancia de filtrado

En las siguientes figuras se pueden ver representadas la tensión y la corriente a ambos lados de cada convertidor. En la Figura 21 y la Figura 22 se pueden ver las tensiones y corrientes del lado de la red para 15 y 8 m/s respectivamente mientras que en la Figura 23 y la Figura 24 se pueden ver las del lado del rotor.

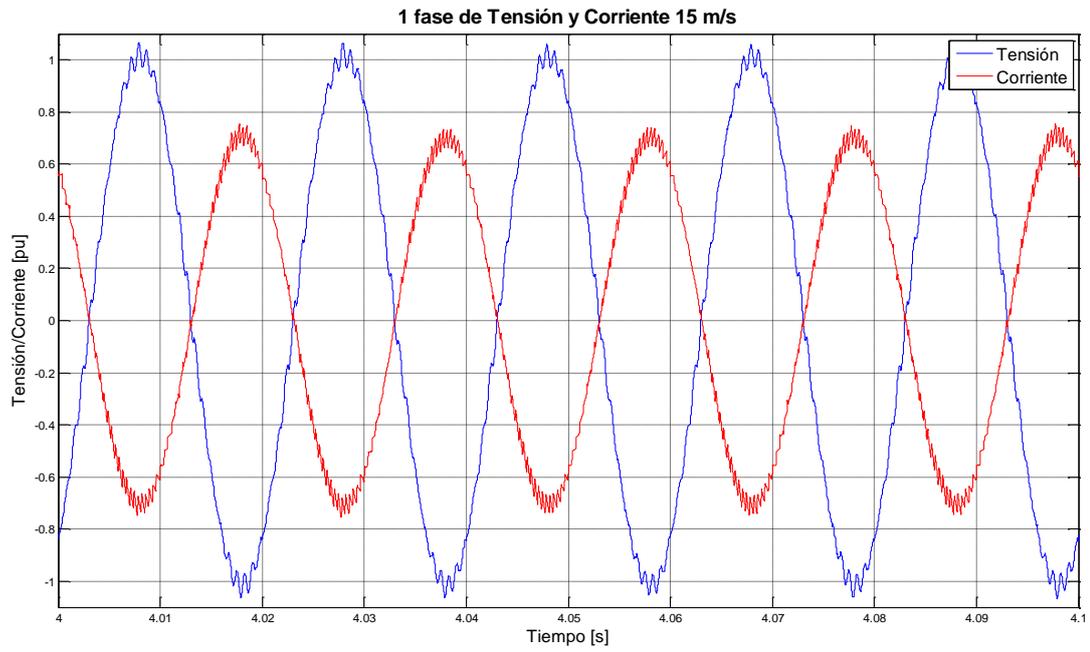


Figura 21 Tensión y corriente lado de la red 15 m/s

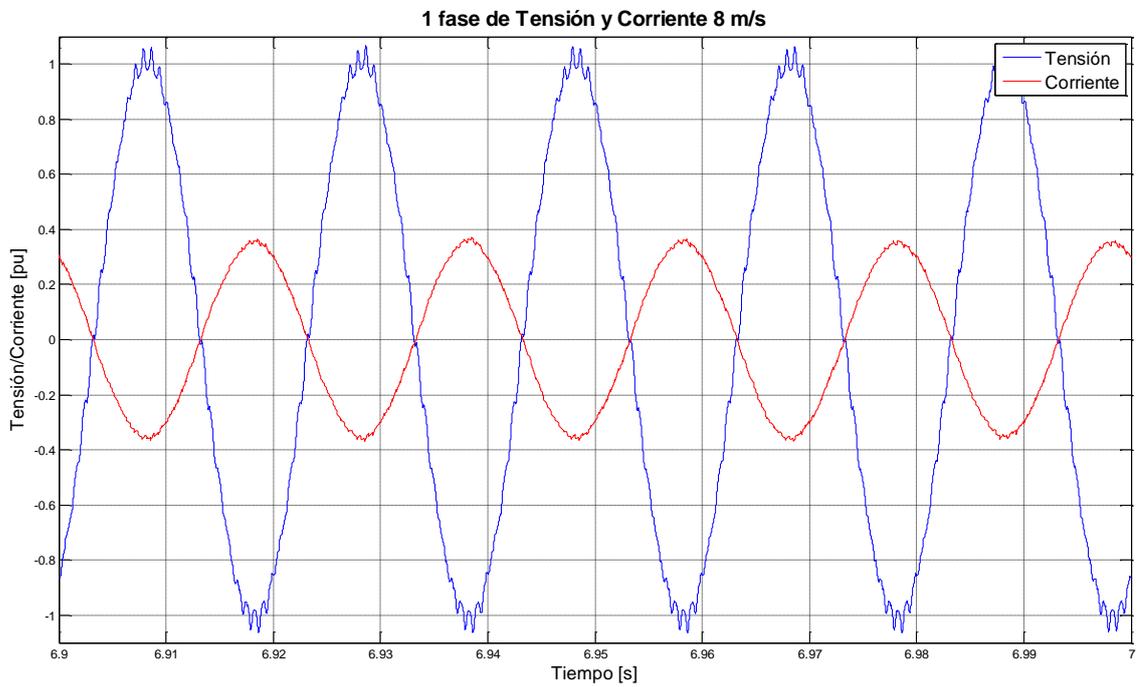
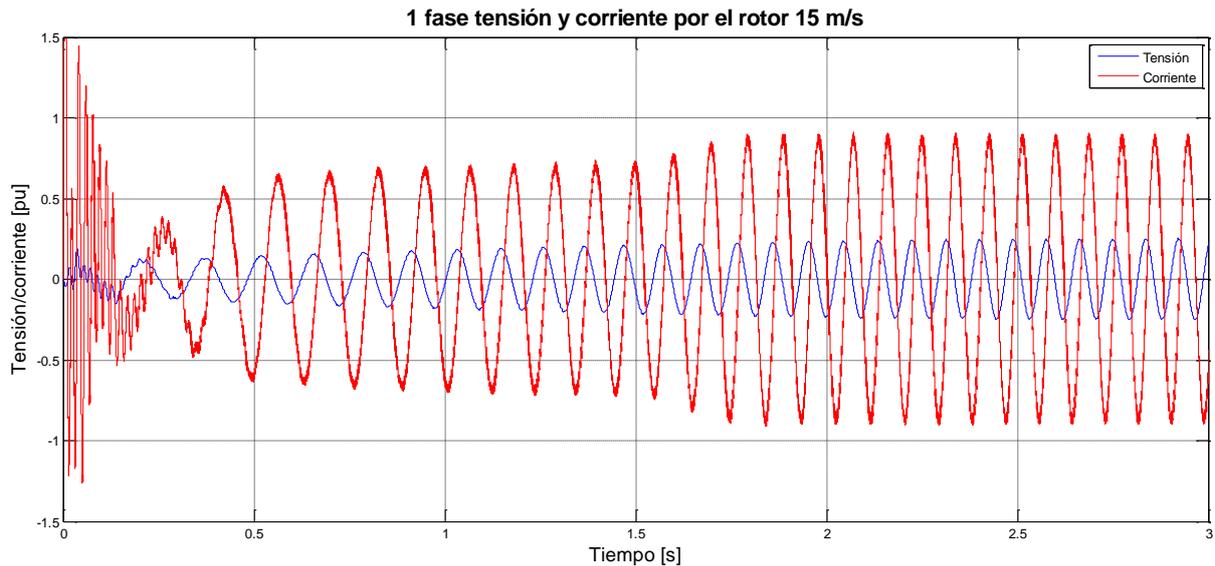
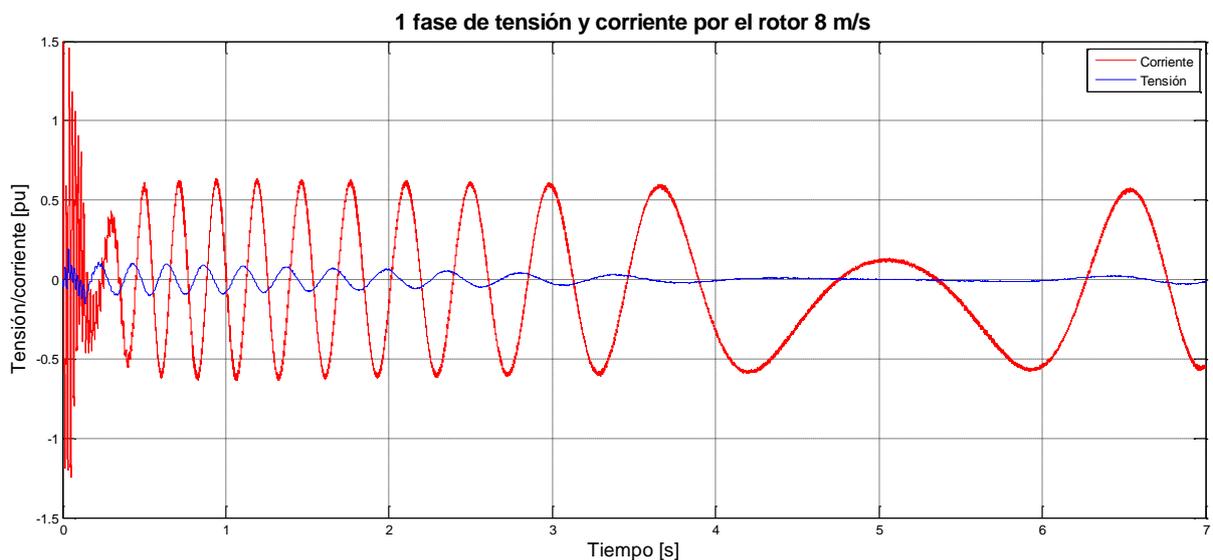


Figura 22 Tensión y corriente lado de la red 8 m/s



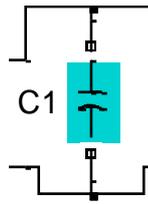
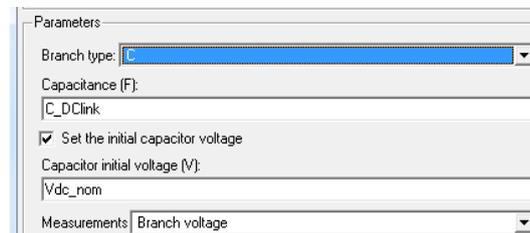
**Figura 23** Tensión y corriente lado del rotor 15 m/s

En la siguiente figura se puede observar la inversión de fases de la que se hablará más adelante.



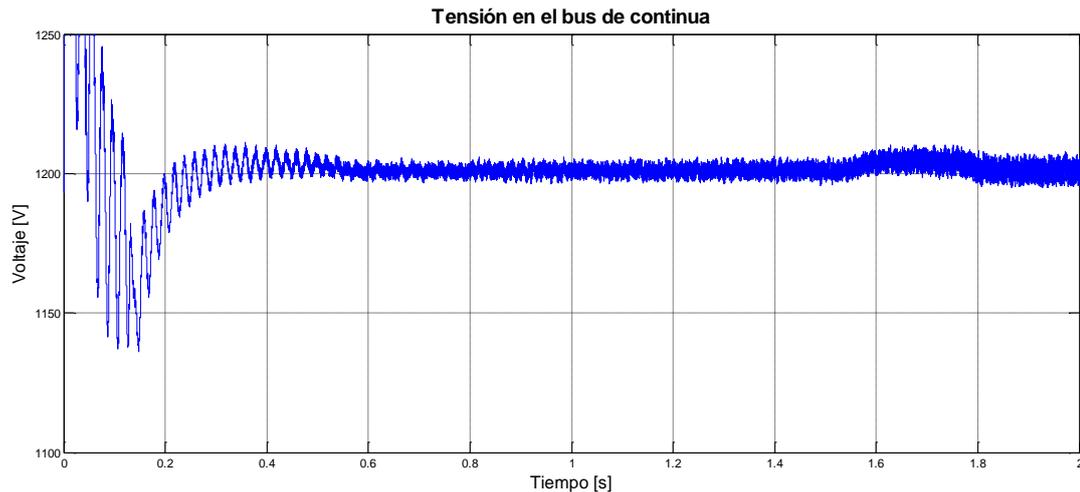
**Figura 24** Tensión y corriente lado del rotor 8 m/s

El condensador de la Figura 25 tiene como finalidad la estabilidad de la tensión de continua reduciendo el rizado de esta tensión, así mismo también amortigua las variaciones que se producen debido a la demanda de corriente por parte del inversor.

**Figura 25** Bloque del condensador**Figura 26** Implementación de los parámetros del condensador

Siendo el voltaje inicial  $V_{dc\_nom}=1200$  V y la capacidad  $C_{DClink}=10000e-6$  F, parámetros que se introducen en la Figura 26.

En las siguientes imágenes se puede apreciar la forma tanto de la tensión como de la corriente en el bus de continua para dos velocidades, 15 y 8 m/s, así como un detalle de la corriente. Se puede apreciar la alta frecuencia a la que está trabajando el bus de continua.

**Figura 27** Tensión en el bus de continua 15 m/s

En la Figura 27 se puede incluso apreciar el momento en que empieza a actuar la regulación por paso de pala, 1,7 s aproximadamente.

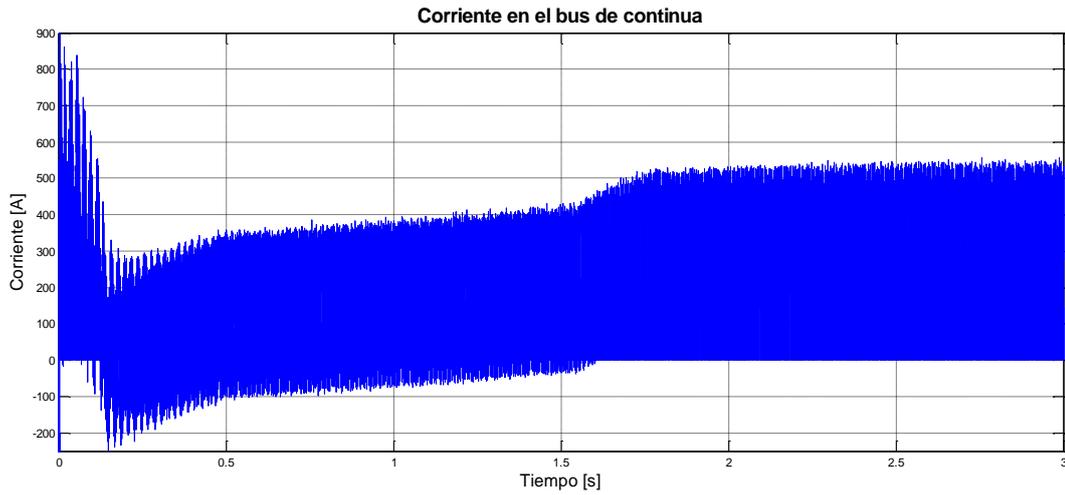


Figura 28 Corriente en el bus de continua 15 m/s

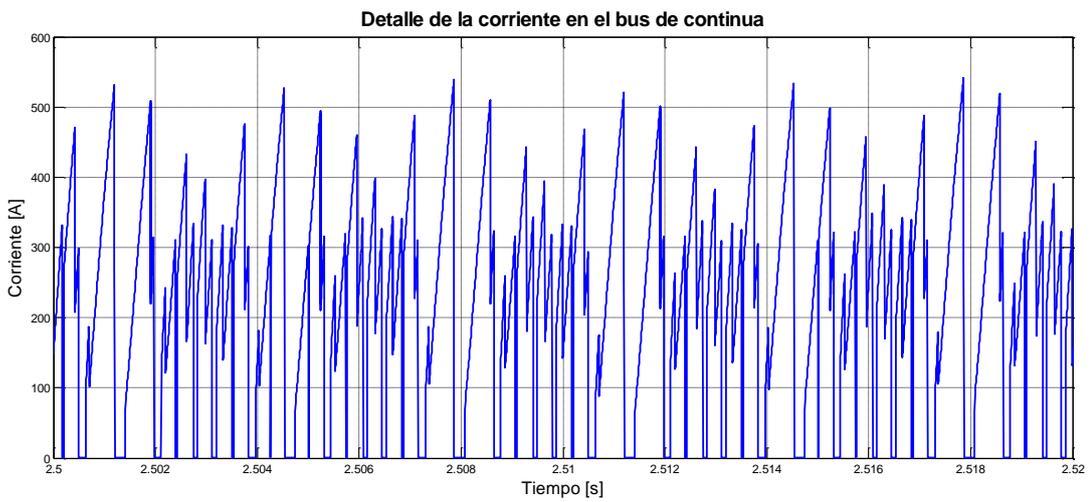


Figura 29 Detalle de la corriente en el bus de continua 15 m/s en régimen permanente

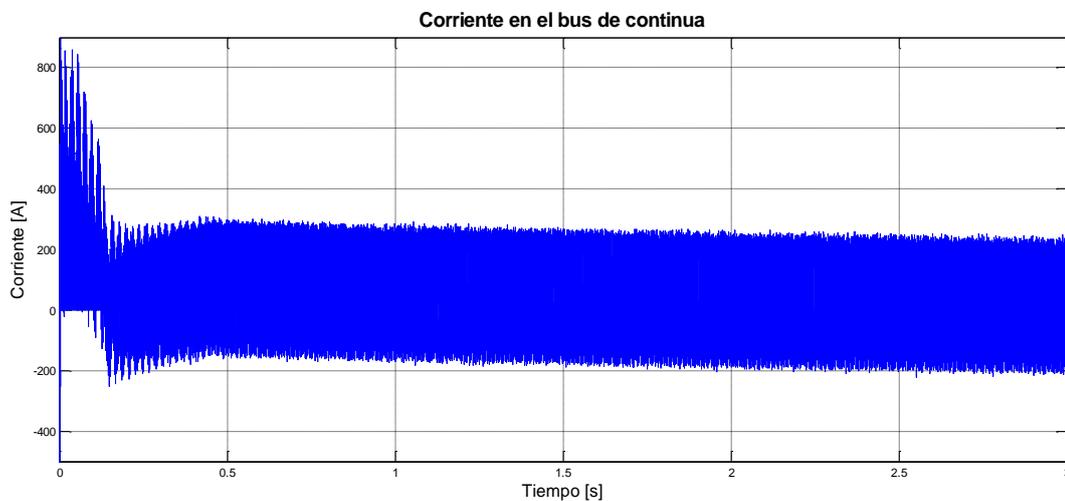
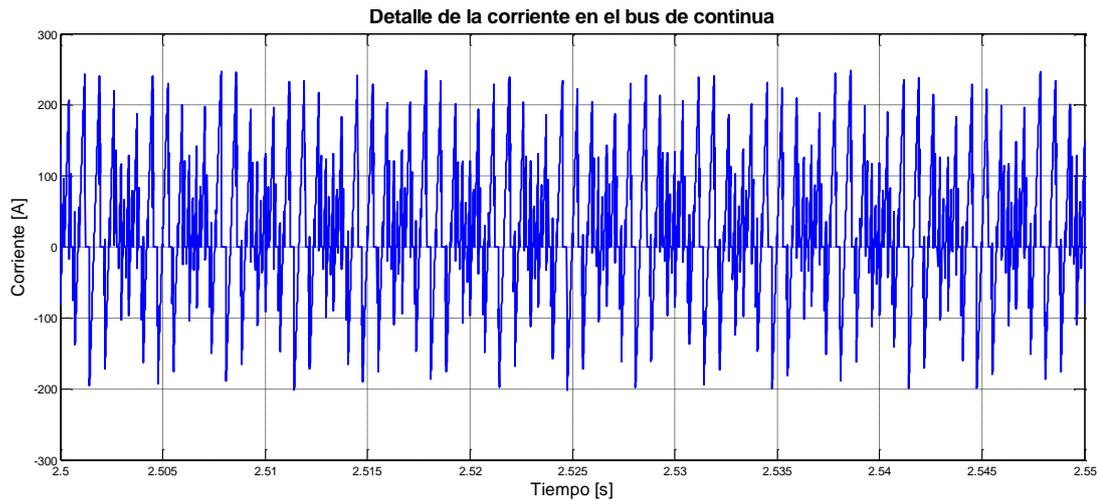
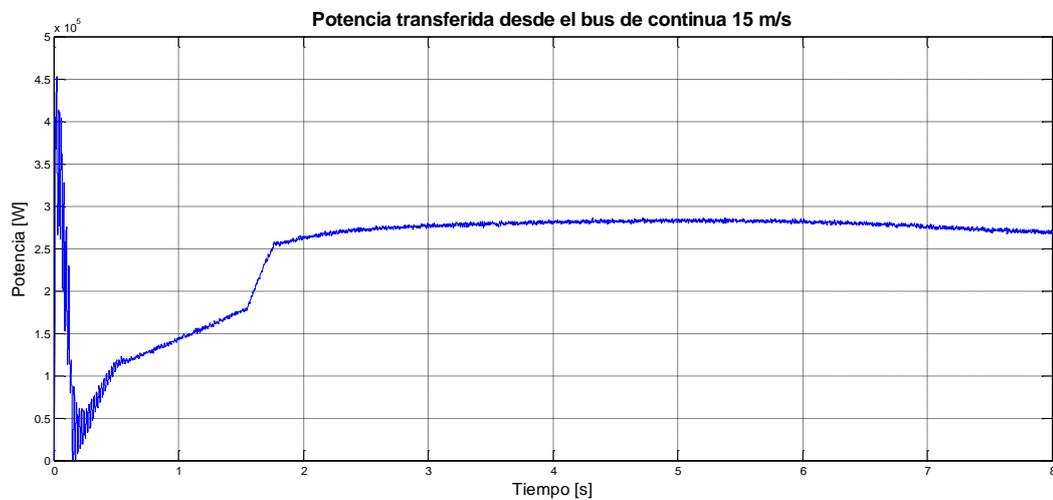


Figura 30 Corriente en el bus de continua 8 m/s

A 8 m/s a diferencia de 15 m/s, la corriente tiene una parte negativa esto se debe a que a 8 m/s el generador está absorbiendo potencia a través del rotor mientras que a 15 m/s la está cediendo.



**Figura 31** Detalle de la corriente en el bus de continua 8 m/s



**Figura 32** Potencia transferida desde el bus de continua 15 m/s

En la Figura 32 se puede ver también el momento en que entra la regulación de paso de pala, aproximadamente en 1,7 s, después se estabiliza alcanzando el permanente.

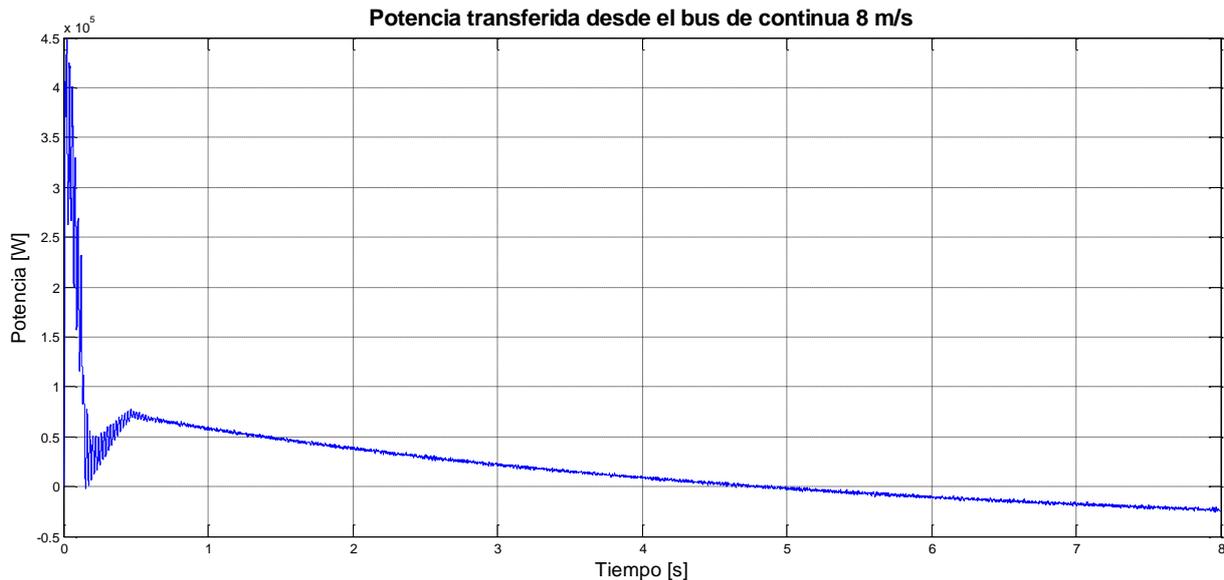


Figura 33 Potencia transferida desde el bus de continua 8 m/s

## 2.2 Principio de funcionamiento

En una máquina asíncrona con el estator conectado a una red trifásica de frecuencia  $f_s$  se tiene:

$$\text{Ec. 2} \quad n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p}$$

Siendo en el presente proyecto  $f_s=50$  Hz y el número de pares de polos  $p=2$

$$\text{Ec. 3} \quad n_s=1500 \text{ r.p.m.}$$

Como se alimenta el rotor con un sistema trifásico de tensiones de frecuencia  $f_R$ , el rotor también creará un campo magnético de velocidad:

$$\text{Ec. 4} \quad n_R = \frac{60 \cdot f_R}{p}$$

La frecuencia rotórica se obtiene, como ya se explicó, gracias al filtrado y posterior seguimiento de la señal de la tensión de entrada al rotor y se le aplicará el signo positivo o negativo tras comparar  $n$  con  $n_s$  como se explicará más adelante.

El deslizamiento se calculará de la siguiente forma:

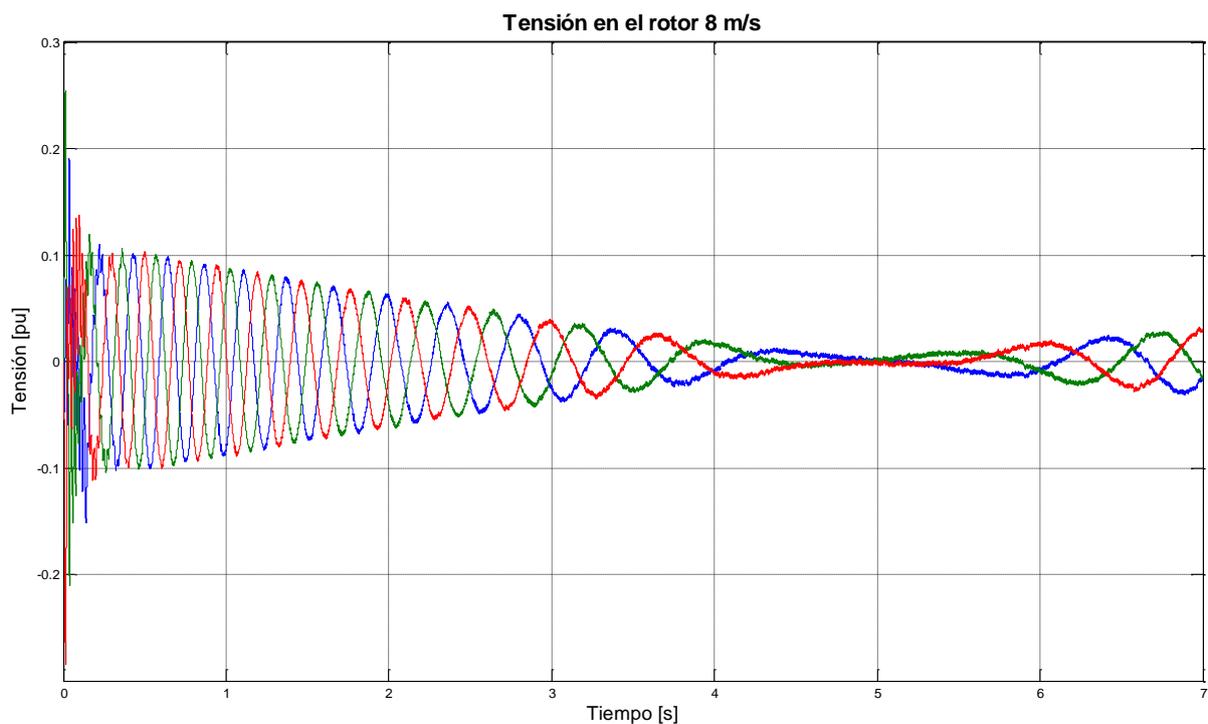
$$\text{Ec. 5} \quad s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Si el rotor está girando a velocidad  $n$ , la velocidad del campo rotórico respecto a un observador fijo será  $n+n_R$ . Para que una máquina desarrolle un par con un valor medio distinto de cero se precisa que los campos magnéticos de estator y rotor giren a idéntica velocidad. De lo dicho se deduce, que la relación entre la frecuencia estatórica, la frecuencia rotórica y la velocidad es:

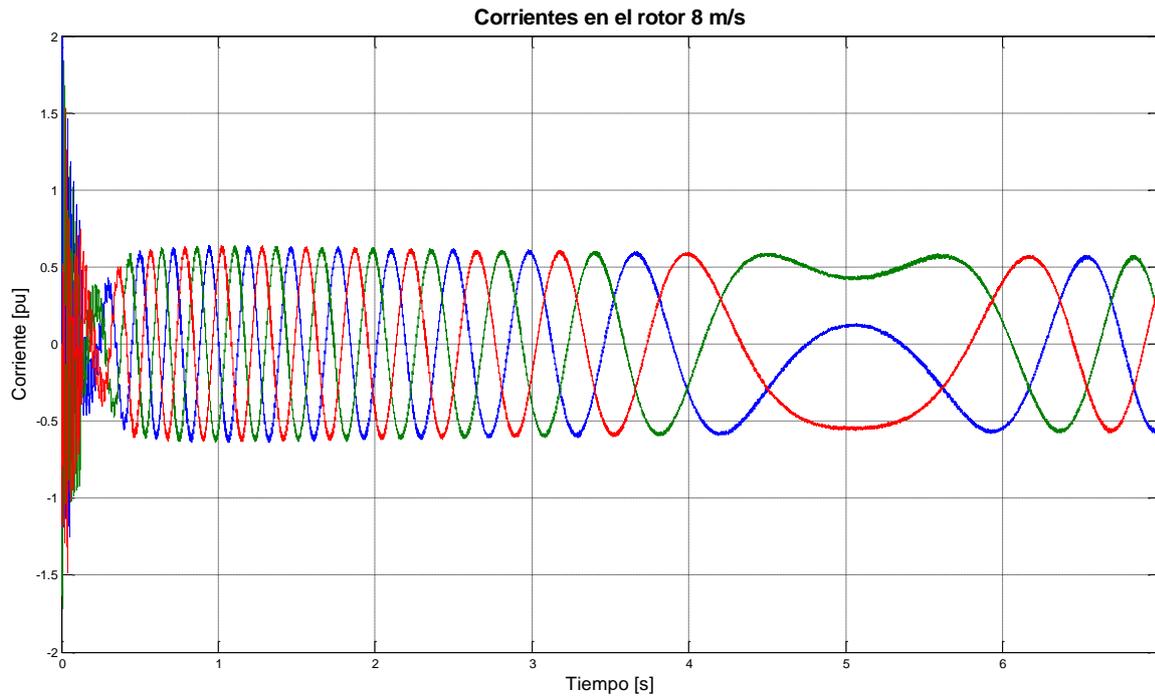
$$\text{Ec. 6} \quad n_s = n + n_R$$

Como la velocidad  $n$  puede ser superior o inferior a  $n_s$ , en el caso de que  $n_s$  sea superior a  $n$  la velocidad  $n_R$  debe ser positiva, sin embargo, en el caso contrario  $n_R$  deberá ser negativa. El sentido de giro del campo magnético depende de la secuencia de fases por lo que si se desea que la velocidad del rotor sea superior a la de sincronismo se ha de aplicar al rotor un sistema trifásico de secuencia inversa respecto de la del estator; en el caso contrario se aplicará una secuencia directa.

La inversión de fases se puede observar en las siguientes gráficas, Figura 34 y Figura 35, con una velocidad del viento de 8 m/s la velocidad del rotor es menor que la de sincronismo se ve como después de un transitorio en el que la velocidad del rotor es superior a la de sincronismo justo cuando estas velocidades se igualan se produce una dicha inversión.



**Figura 34** Inversión de fases a 8 m/s

**Figura 35 Inversión de fases a 8 m/s**

Teniendo en cuenta todo lo dicho hasta ahora, a continuación se puede observar una tabla donde se comprueba que con pequeñas diferencias se cumple la ecuación Ec. 6 para distintas velocidades del viento con las frecuencias rotóricas y la velocidad del rotor obtenidas en la simulación.

V. viento [m/s]	$f_{Rmedida}$ [Hz]	$f_{Rteórica}$ [Hz]	n [pu]	n [rpm]	$n_r$ [rpm]	$n_s$ [rpm]
8	5	5,875	0,8825	1323,75	150	1473,75
9	2	0,5	1,01	1515	-60	1455
10	5	2,5	1,05	1575	-150	1425
11	8,51	8,8	1,176	1764	-255,3	1508,7
12	10,47	10,385	1,2077	1811,55	-314,1	1497,45
13	10,53	10,59	1,2118	1817,7	-315,9	1501,8
14	11,11	10,665	1,2133	1819,95	-333,3	1486,65
15	12,5	12	1,24	1860	-375	1485
16	14,29	14,55	1,291	1936,5	-428,7	1507,8
17	18,18	18,15	1,363	2044,5	-545,4	1499,1
18	19,6	20	1,4	2100	-588	1512
19	24,5	25	1,5	2250	-735	1515
20	27,03	28,5	1,57	2355	-810,9	1544,1
21	31,2	32	1,64	2460	-936	1524

**Tabla 6 Valores obtenidos a partir de la simulación**

Las filas destacadas indican las velocidades del viento a las que posteriormente se hará referencia a la hora de realizar los distintos análisis necesarios para obtener las conclusiones.



Gracias a esta tabla es posible realizar la siguiente gráfica, Figura 36, donde se puede ver la variación de la frecuencia rotórica ante distintas entradas de la velocidad del viento. También se ve en la Figura 37 como se cumple aproximadamente la ecuación Ec. 6, manteniéndose las  $n_s$  cercanas a la velocidad de sincronismo.

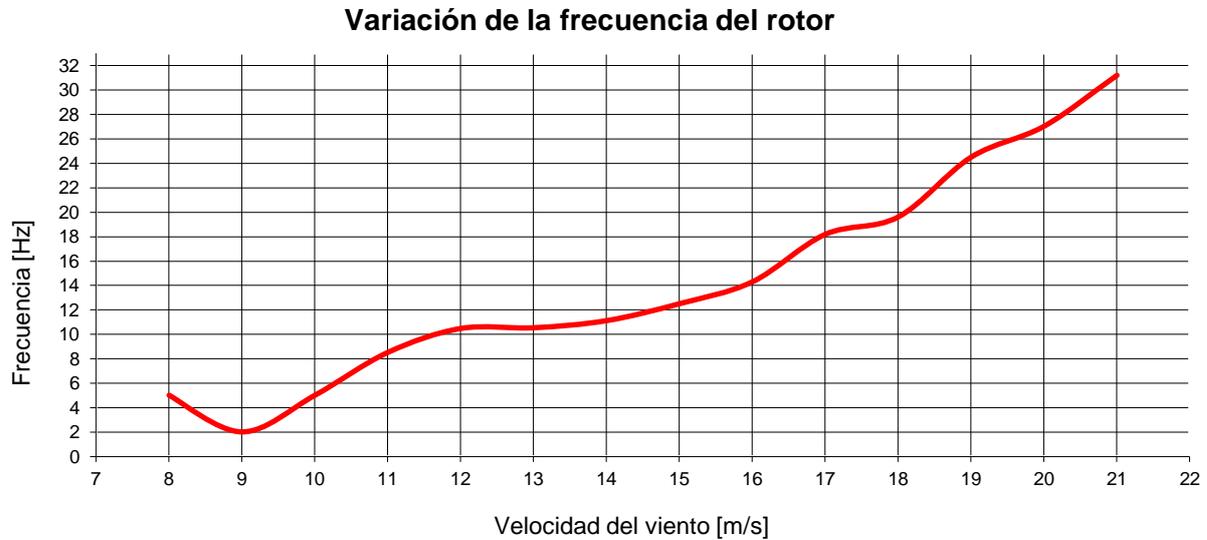


Figura 36 Variación de la frecuencia rotórica

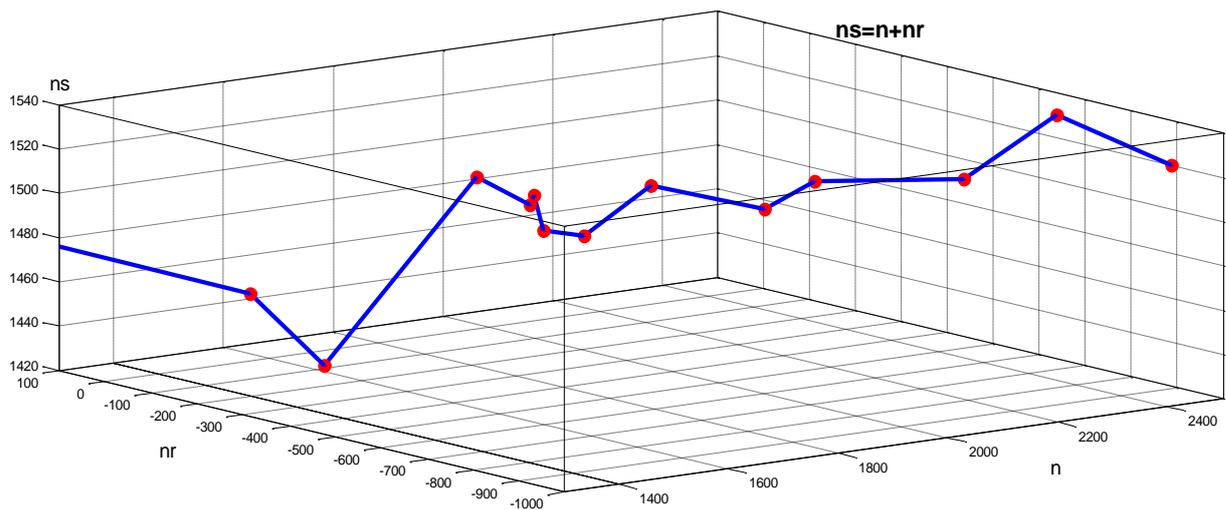


Figura 37  $ns = n + nr$

### 2.3 Circuito equivalente de un generador doblemente alimentado

El circuito equivalente de una máquina de inducción doblemente alimentada se muestra en la Figura 38; en este circuito las potencias en la fracción de la fuente de tensión de valor  $U_r \cdot (1/s-1)$  y de la resistencia  $R_r \cdot (1/s-1)$  representan la potencia mecánica. Este circuito servirá de base para hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante la simulación y los resultados teóricos que se obtendrán al resolver este circuito. Hay que tener en cuenta que este circuito está pensado para llevar a cabo un estudio en régimen permanente por lo cual se tendrá en cuenta a la hora de

verificar la bondad de los resultados obtenidos mediante simulación una vez que el sistema esté estabilizado.

Circuito equivalente del generador asíncrono doblemente alimentado

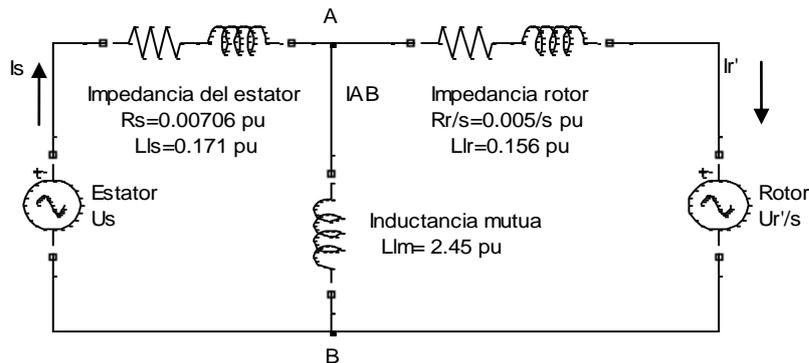


Figura 38 Circuito equivalente del generador asíncrono doblemente alimentado

## 2.4 Balance de potencias

El siguiente paso consistirá en realizar un balance de potencias que permitirá analizar las condiciones que se requieren para que esta máquina de inducción funcione como generador tanto para velocidades superiores como inferiores a la de sincronismo.

Como se indicó anteriormente, en este generador el estator está conectado a una red de tensión  $U_s$  y el rotor está conectado a una fuente de tensión  $U_r$ . Para realizar el balance de potencias se tomará convenio de signos generador, lo que supone que la intensidad se toma saliente a la máquina por el estator y por el rotor, el sentido de las corrientes puede verse en la Figura 38. Debe indicarse, sin embargo, que la utilización de este convenio no significa necesariamente que la potencia sea saliente de la máquina por el estator o por el rotor, pues ello depende del punto de funcionamiento de la máquina.

En las siguientes líneas se comprobará como los resultados obtenidos con la simulación son coherentes con el análisis del modelo equivalente del generador para dos velocidades del viento diferentes 8 y 15 m/s, escogidas por trabajar con secuencias de fases diferentes.

Del análisis del circuito equivalente se desprenden las siguientes ecuaciones

$$\text{Ec. 7} \quad U_{AB} = U_S - I_S \cdot (R_S + X_{LS} \cdot j)$$

$$\text{Ec. 8} \quad I_{AB} = \frac{U_{AB}}{X_{Lm} \cdot j}$$

$$\text{Ec. 9} \quad I_r' = I_s - I_{AB}$$



$$\text{Ec. 10} \quad \frac{U_r'}{s} = U_{AB} - I_r' \left( \frac{R_r}{s} + X_{Lr} \cdot j \right)$$

La relación de transformación del generador, que permite trasladar las variables del rotor al estator, se puede calcular de dos maneras distintas, con las relaciones que existen respectivamente entre la corriente  $I_r'$  e  $I_r$  y entre la tensión  $U_r'$  y  $U_r$  de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 11} \quad rtt = \frac{U_r'}{U_r}$$

$$\text{Ec. 12} \quad rtc = \frac{I_r'}{I_r}$$

La potencia mecánica que la máquina recibe por su eje (y que es convertida en potencia eléctrica) tiene por expresión

$$\text{Ec. 13} \quad P_{mi} = -3 \frac{1-s}{s} R_r I_r'^2 - 3 \frac{1-s}{s} U_r' I_r' \cos \varphi_r$$

El par electromagnético desarrollado por la máquina se puede obtener a partir de la potencia mecánica:

$$\text{Ec. 14} \quad T_e = \frac{P_{mi}}{\Omega} = \frac{P_{mi}}{\Omega_s (1-s)} = \frac{P_{RS}}{\Omega_s}$$

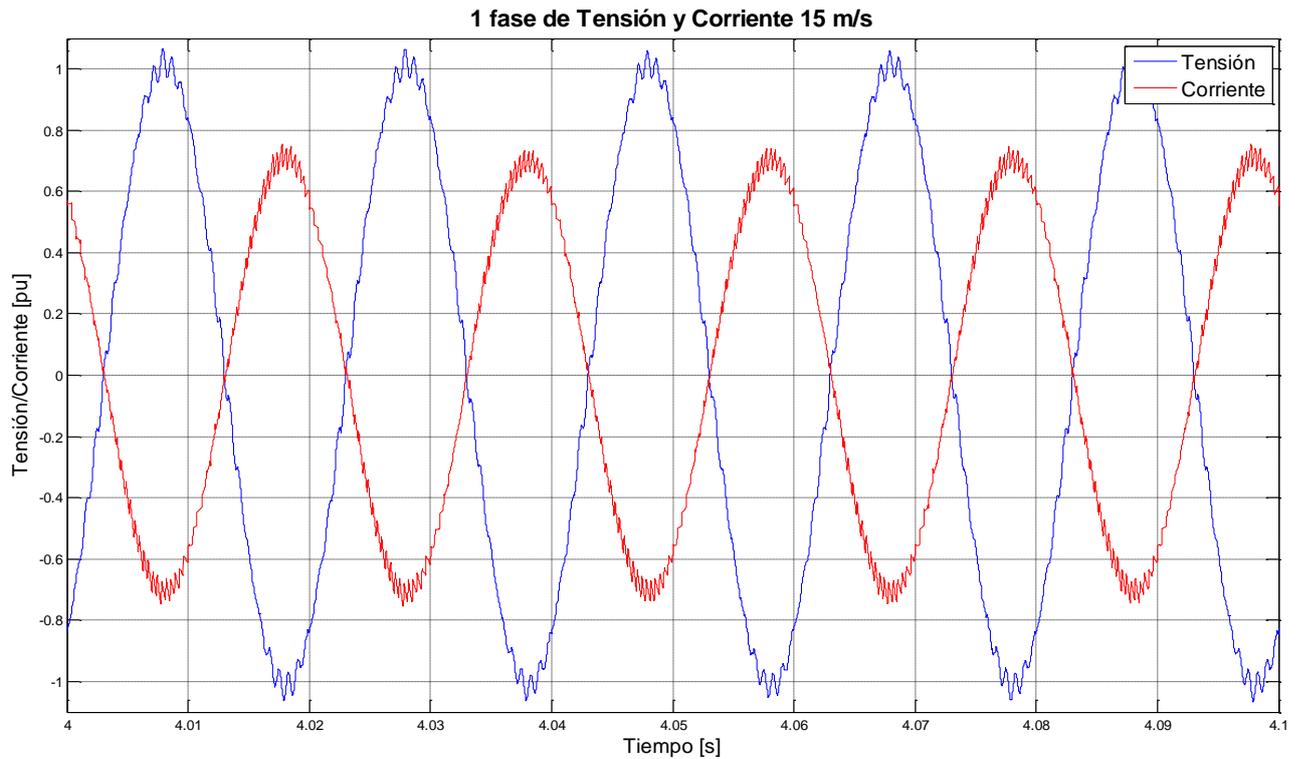
Dado que la velocidad de sincronismo de la máquina ( $\Omega_s$ ) es constante, el par desarrollado por la máquina, es proporcional a la potencia trasvasada del rotor al estator

$$\text{Ec. 15} \quad P_{RS} = T_e \cdot \Omega_s$$

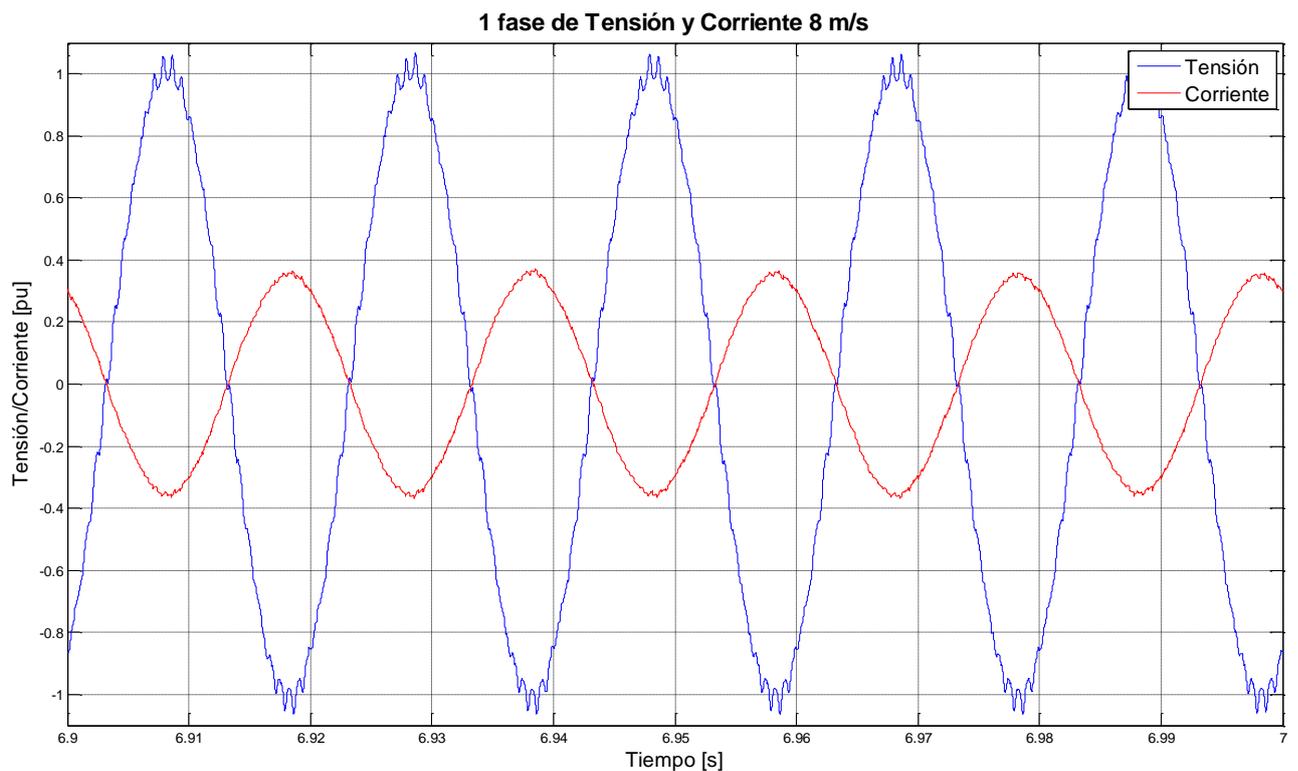
Siendo  $P_{RS}$  la potencia transferida de rotor a estator cuya expresión es:

$$\text{Ec. 16} \quad P_{RS} = -3 \frac{R_r}{s} I_r'^2 - 3 \frac{U_r'}{s} I_r' \cos \varphi_r$$

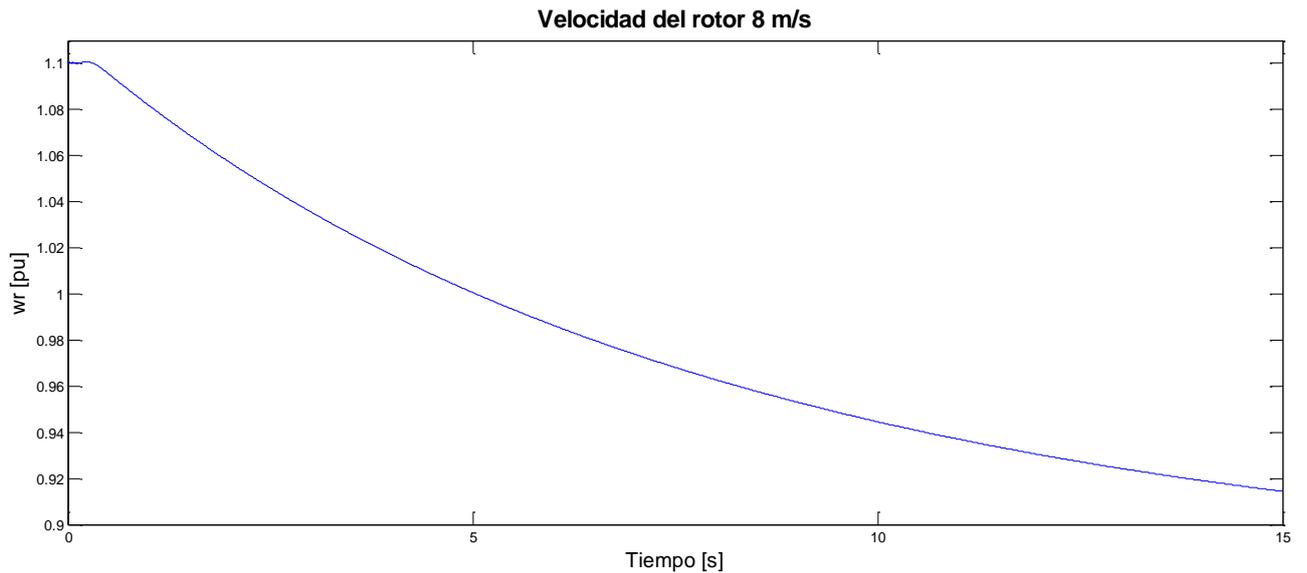
De las siguientes gráficas, Figura 39 y Figura 40, se obtendrán los valores de  $U_s$  e  $I_s$  para las distintas velocidades del viento (8 y 15 m/s) así como sus respectivos desfases. También es necesario sacar el deslizamiento, Figura 41 y Figura 42.



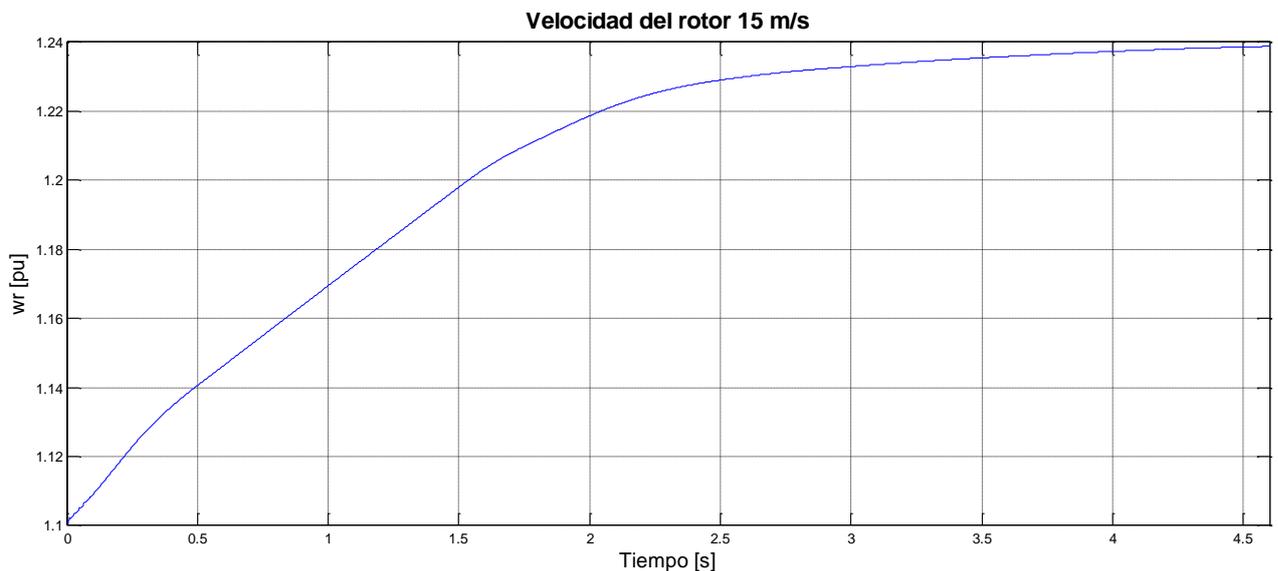
**Figura 39** Representación simultánea de tensión (azul) y corriente (rojo) cuando el aerogenerador está expuesto a una velocidad de 15 m/s



**Figura 40** Representación simultánea de tensión (azul) y corriente (rojo) cuando el aerogenerador está expuesto a una velocidad de 8 m/s

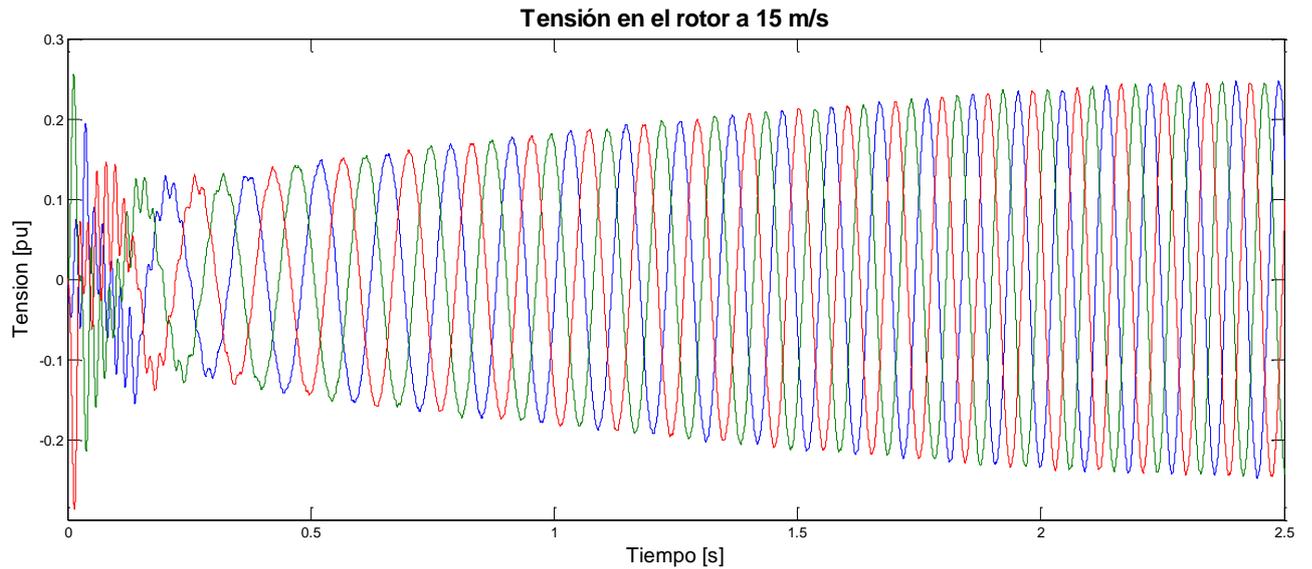


**Figura 41** Velocidad del rotor ante una velocidad del viento de 8 m/s

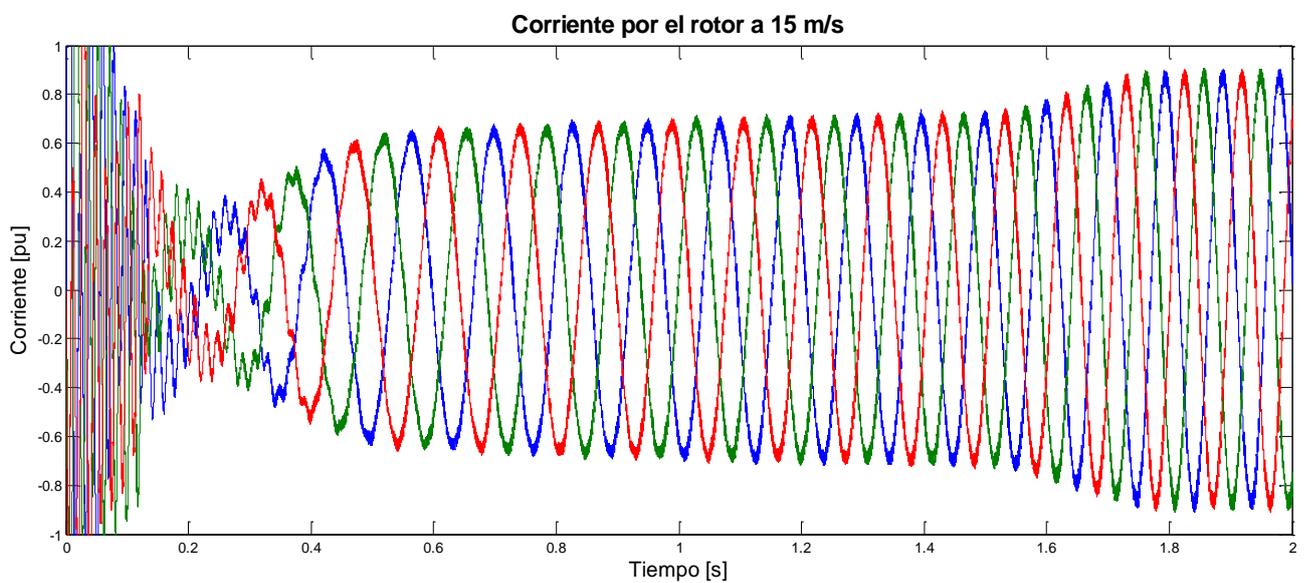


**Figura 42** Velocidad del rotor ante una velocidad del viento de 15 m/s

Los valores de  $I_r$  y  $U_r$  para una velocidad del viento de 15 m/s se obtienen de las graficas siguientes, Figura 43 y Figura 44. Para 8 m/s se obtienen de las graficas mostradas anteriormente, Figura 34 y Figura 35. Los largos tiempos previos a la estabilización se deben en parte a la constante de inercia tan elevada que presenta el generador (4,65 s).



**Figura 43 Tensión en el rotor a 15 m/s**



**Figura 44 Corriente en el rotor a 15 m/s**

El deslizamiento se calcula con la ecuación Ec. 5. Los resultados obtenidos en valores por unidad son:

V. viento	$U_s$	$I_s$	$\varphi_s$	$U_r$	$I_r$	s
15 m/s	1	0.7	180°	0.25	0.85	-0.24
8 m/s	1	0.32	180°	0.09	0.55	0.1175

**Tabla 7**

Con esto ya es posible resolver las ecuaciones Ec. 7, Ec. 8, Ec. 9, Ec. 10, Ec. 11 y Ec. 12 mediante programación en el Matlab; resultados en valores por unidad.

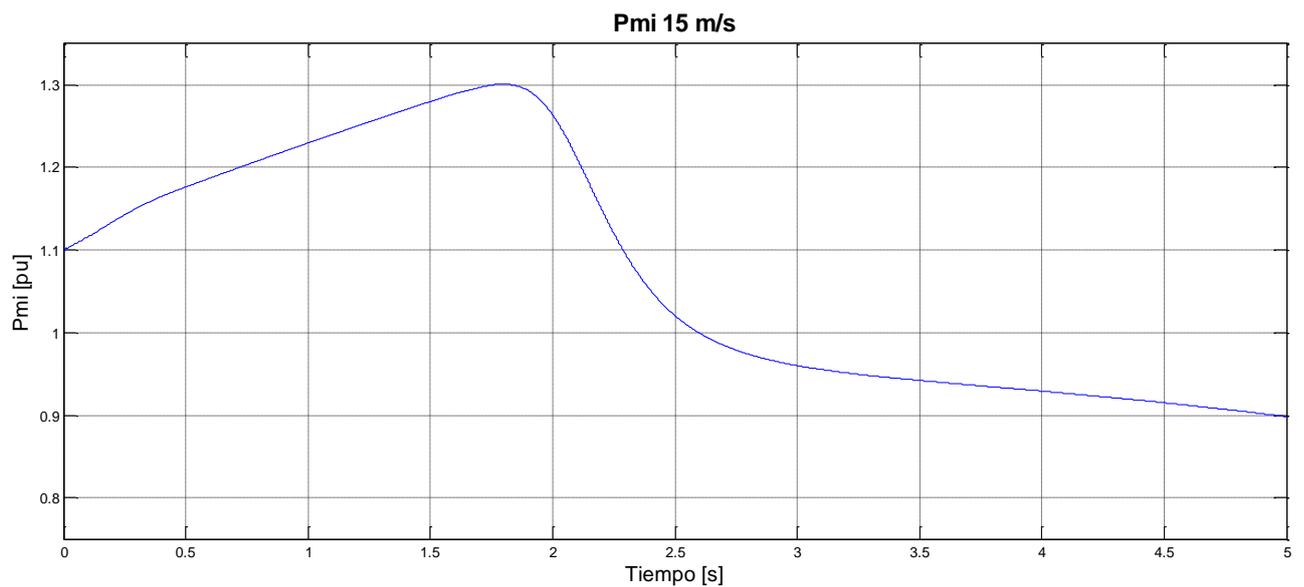
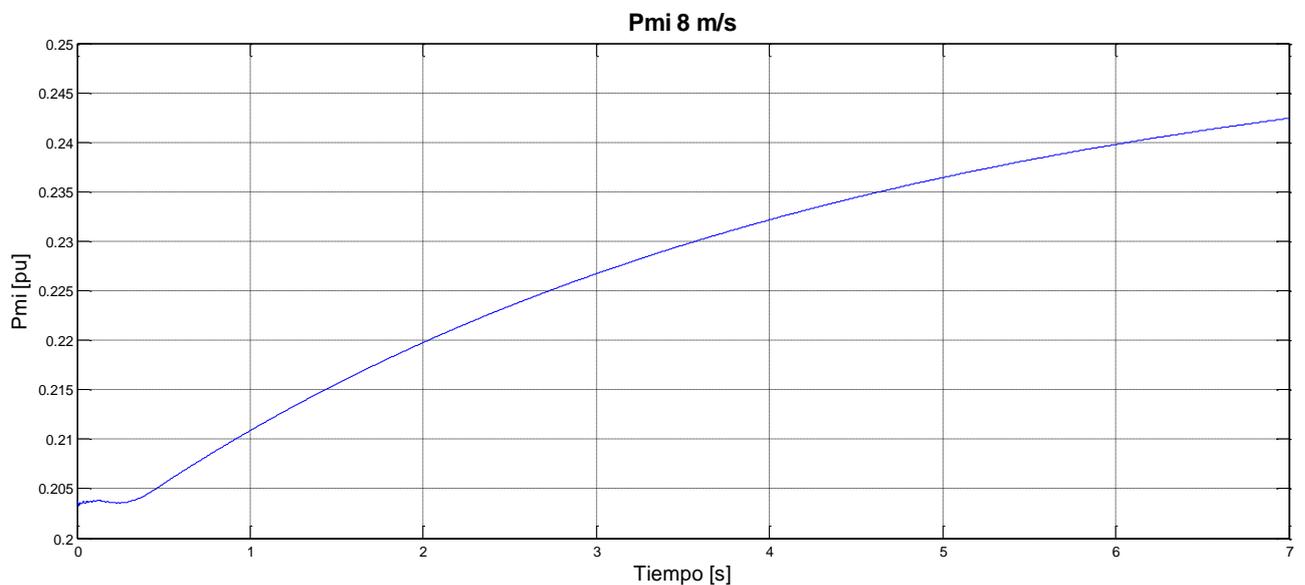


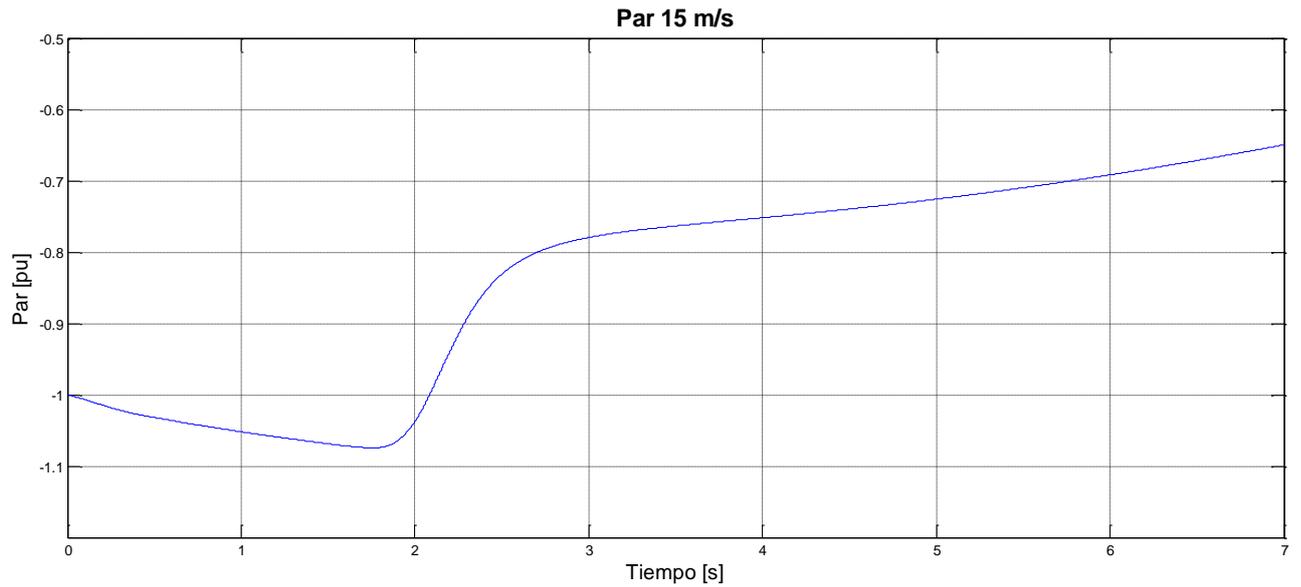
V. viento	$U_r'$	$I_r'$	$\phi_r$	rtc	rtt
15 m/s	0.2596	0.8538	-138.1912	1.0045	0.9632
8 m/s	0.1274	0.5334	-125.1251	0.9699	0.9204

Tabla 8

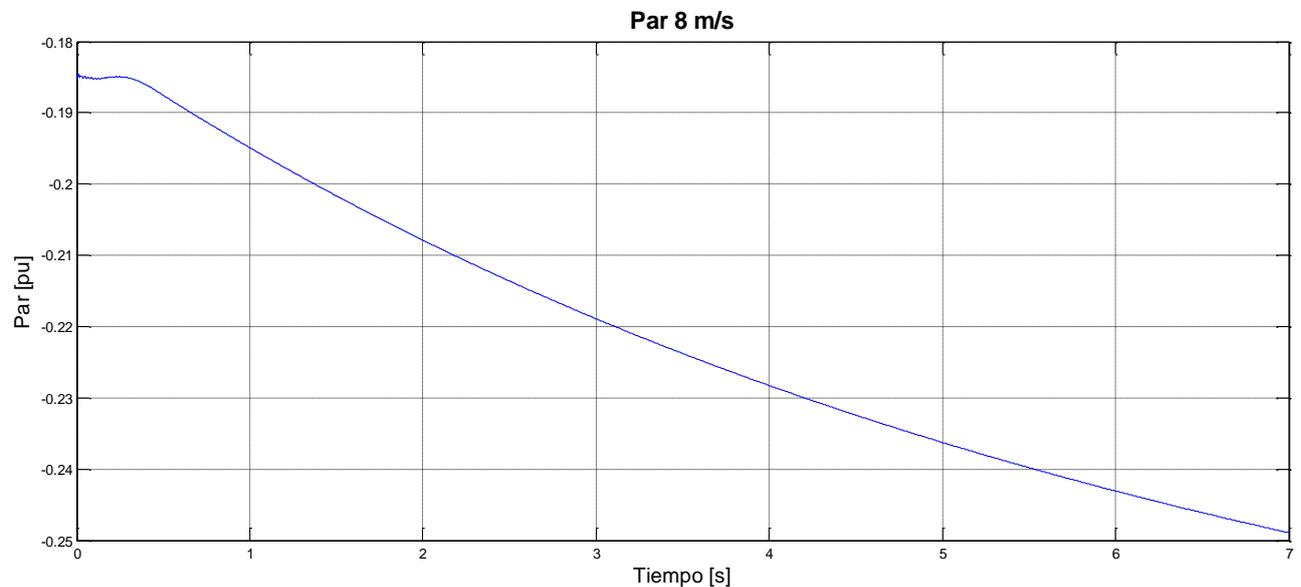
Se comprueba como las relaciones de transformación tienen un valor semejante, lo cual da una idea de que los cálculos son correctos.

A continuación también se muestran unas gráficas donde se muestra el par y la potencia mecánica. Se recuerda que para 15 m/s la regulación por cambio de paso de pala actúa a partir de los 1,7 s aproximadamente, de ahí la variación que se aprecia en la evolución del par y la potencia mecánica interna.

Figura 45  $P_{mi}$  con una velocidad del viento de 15 m/sFigura 46  $P_{mi}$  con una velocidad del viento de 8 m/s



**Figura 47** Par con una velocidad del viento de 15 m/s



**Figura 48** Par con una velocidad del viento de 8 m/s

Se puede ahora comparar los resultados obtenidos de las ecuaciones Ec. 13, Ec. 14, Ec. 15 y Ec. 16 con las gráficas obtenidas a partir de la simulación, los resultados de la Tabla 9 están en valores por unidad. Hay que tener en cuenta que el valor tanto de la potencia mecánica interna como el del par electromagnético que se considerará a la hora de comparar es el valor en  $t=1.7$  s para 15 m/s, punto a partir del cual entra en acción la regulación por ángulo de pala y donde no es posible realizar esta comparación.



V. viento	$T_e$ gráfica	$T_e$ Ec. 14	$P_{mi}$ gráfica	$P_{mi}$ Ec. 13	$P_{RS}$ Ec. 15	$P_{RS}$ Ec. 16
15 m/s	-1.074	-1.0484	1.302	1.3084	1.0484	1.0552
8 m/s	-0.286	-0.2776	0.2525	0.4246	0.2776	0.2811

Tabla 9

Se observa como los valores concuerdan, si bien la potencia transferida del rotor al estator para 8 m/s tiene un error algo mayor; esto puede deberse a las dificultades encontradas a la hora de realizar las mediciones a esta velocidad ya que el tiempo de estabilización es muy alto.

En la siguiente tabla se dan los valores para distintas velocidades del viento obtenidos mediante simulación de potencia mecánica interna ( $P_{mi}$ ), deslizamiento (s), Potencia transferida a la red desde el estator ( $P_{Smedida}$ ), potencia transferida a la red desde el rotor ( $P_{Rmedida}$ ), potencia total sumando la del rotor y la del estator ( $P_{Tmedida}$ ) y potencia total generada medida directamente a través de la simulación del modelo ( $P_{Gmedida}$ ).

V. viento [m/s]	$P_{mi}$ [pu]	s	$P_{Smedida}$ [MW]	$P_{Rmedida}$ [MW]	$P_{Tmedida}$ [MW]	$P_{Gmedida}$ [MW]
8	0,2525	0,1175	0,61	-0,01	0,6	0,6
9	0,36	-0,01	0,66	0,01	0,67	0,668
10	0,4935	-0,05	0,76	0,072	0,832	0,83
11	0,656	-0,176	0,85	0,145	0,995	1
12	0,8365	-0,2077	1,15	0,235	1,385	1,385
13	0,892	-0,2118	1,223	0,25	1,473	1,475
14	0,893	-0,2133	1,22	0,255	1,475	1,475
15	1,302	-0,24	1,21	0,265	1,475	1,475
16	1,418	-0,2858	1,15	0,33	1,48	1,48
17	1,515	-0,3636	1,087	0,39	1,477	1,48
18	1,58	-0,392	1,05	0,43	1,48	1,48
19	1,641	-0,49	0,99	0,495	1,485	1,485
20	1,674	-0,5406	0,95	0,535	1,485	1,485
21	1,688	-0,624	0,91	0,575	1,485	1,486

Tabla 10

Se puede apreciar como la curva de potencia, Figura 49 , que se obtiene a partir de los datos de la Tabla 10, es similar a la que proporciona el fabricante, Figura 50.

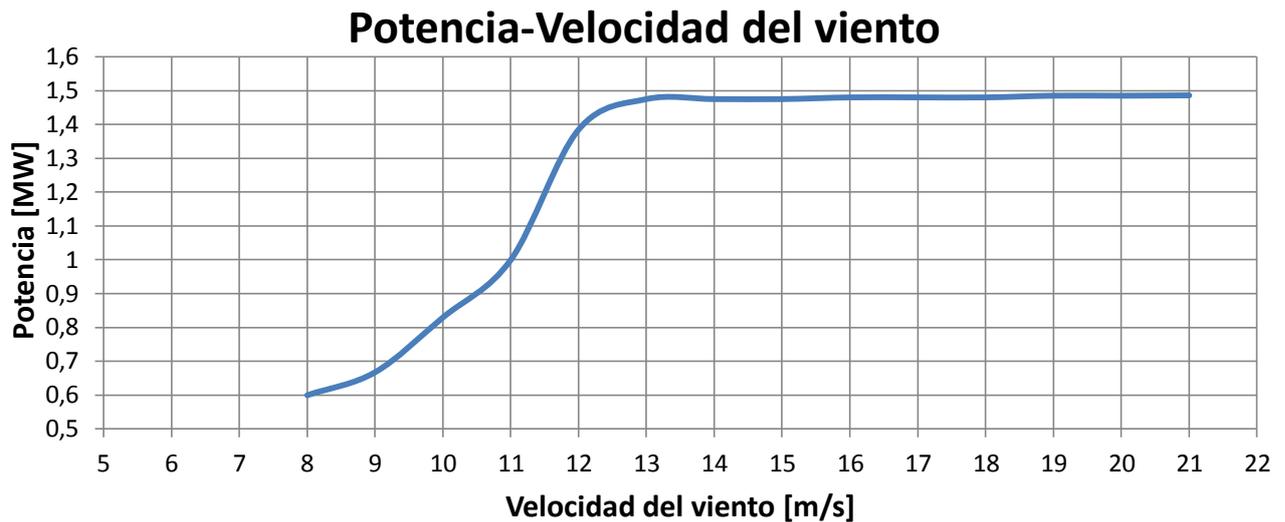


Figura 49 Potencia activa/Velocidad del viento

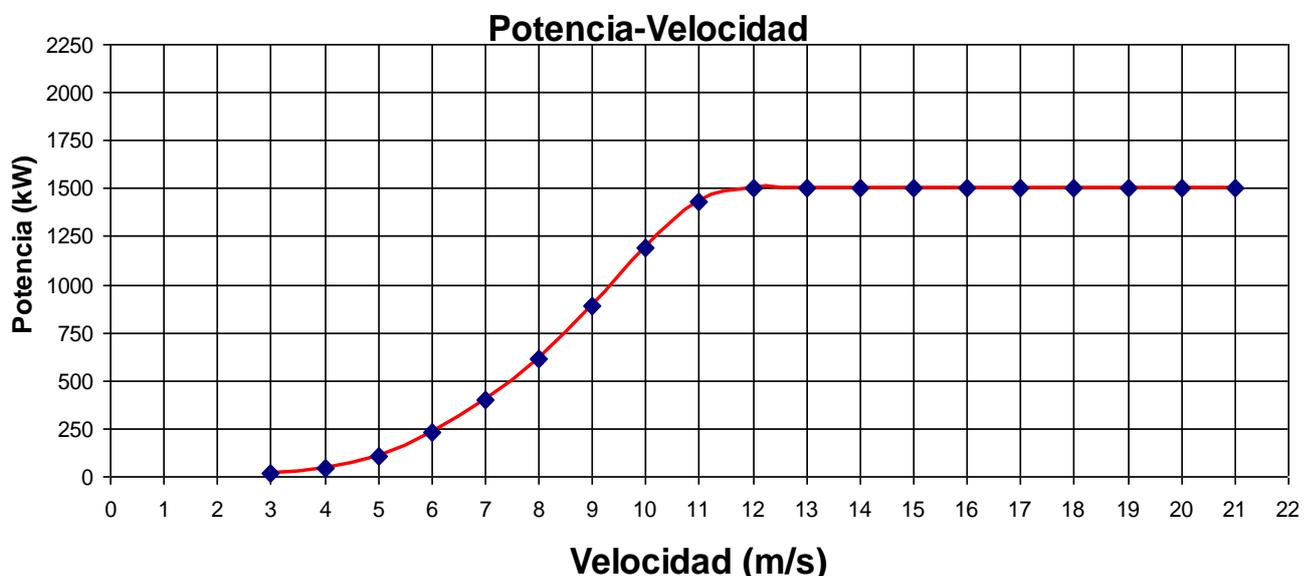


Figura 50 Potencia activa velocidad del viento (fabricante)

La máquina asíncrona doblemente alimentada puede funcionar como generador tanto para velocidades de giro superiores a la de sincronismo como para velocidades de giro inferiores a la de sincronismo. Del balance de potencias realizado se desprende que cuando la máquina funciona como generador a velocidades inferiores a la de sincronismo, es decir, con deslizamientos comprendidos entre cero y uno, el signo de la potencia en la fuente del rotor  $P_R$  es negativo, lo cual significa que la máquina absorbe energía del convertidor electrónico, que debe por tanto funcionar como inversor. Aunque la máquina absorbe potencia por el rotor y la entrega por el estator, la potencia total es generada.

Cuando la máquina funciona a velocidades superiores a la de sincronismo, es decir, con deslizamientos negativos, el signo de la potencia del rotor es positivo, con lo que la máquina entregaría a la red por el estator y por el rotor; en este caso el convertidor electrónico conectado en

los terminales del rotor debe funcionar como rectificador. Si se desea trabajar tanto para velocidades inferiores como superiores a la de sincronismo el convertidor debe ser bidireccional. En la Figura 51 se puede ver como se alcanzan ambas velocidades.

### Potencias en el estator, rotor y total

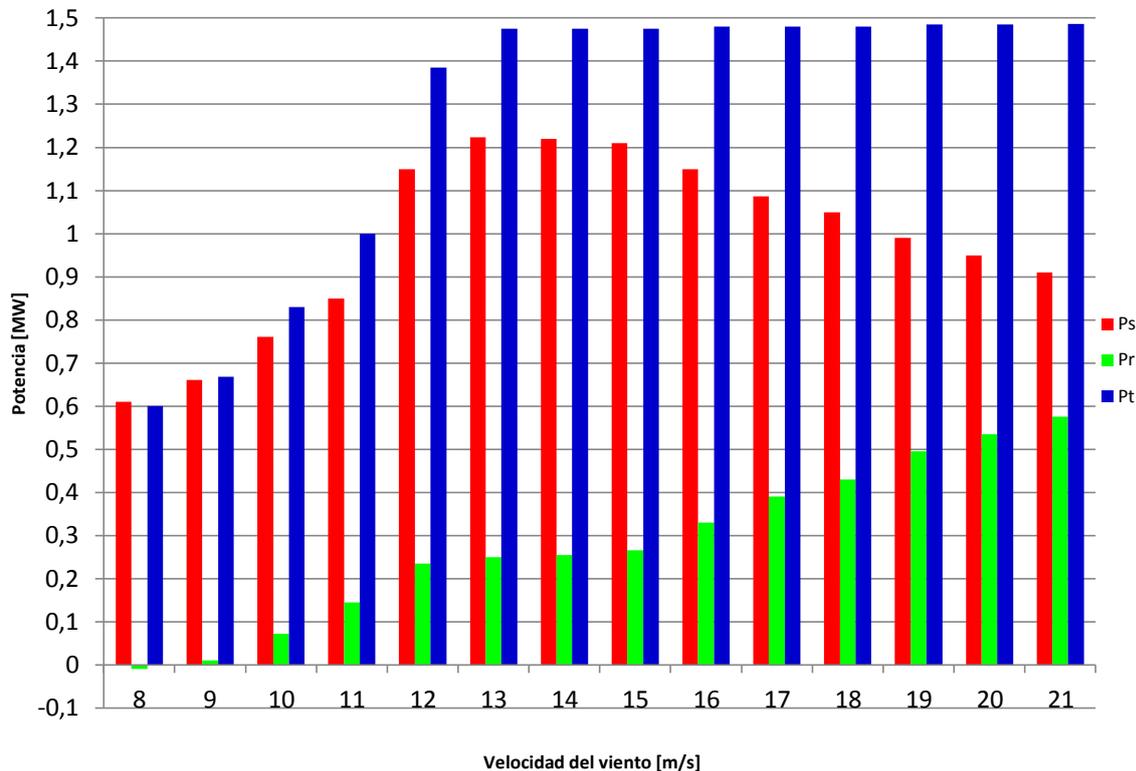


Figura 51 Potencias generadas por estator y rotor según la velocidad del viento

De la Figura 51 se deduce la ventaja fundamental de este sistema de velocidad variable. Cuando el régimen de giro supera la velocidad de sincronismo la potencia que es capaz de desarrollar el sistema es superior a la potencia asignada al devanado estático del generador, además el control global del sistema se realiza con un dispositivo ubicado entre el rotor y la red, se trata de un convertidor AC/DC/AC que maneja una fracción de la potencia total producida, lo que reduce los costes de estos equipos que, por su sofisticación, son habitualmente caros.

Otra lectura de las ecuaciones de funcionamiento del generador asíncrono de doble alimentación es que si se considera la potencia mecánica constante, como ocurre cuando se utilizan turbinas con control de paso de pala, la potencia asignada del estator se reduce cuando aumenta la velocidad de giro de diseño del generador, Figura 51. Evidentemente, una reducción de la potencia del estator supone un aumento de la potencia que se deberá manejar por el rotor y por lo tanto por los convertidores electrónicos.

#### 2.4.1 Balance de potencia activa y reactiva según circuito equivalente

Para realizar el balance de las potencias activa y reactiva se utilizarán las ecuaciones que pueden verse a continuación, se utilizan los valores de la tensión y la corriente tanto en el rotor como en el estator que se han calculado previamente en el apartado 6.4; también se tienen en cuenta los desfases existentes entre tensiones y corrientes.



Potencia activa:

$$\text{Ec. 17} \quad P_s = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s$$

$$\text{Ec. 18} \quad P_r = 3 \cdot U_r' \cdot I_r' \cdot \cos \varphi_r$$

Para tener los resultados en valores absolutos se transforman las ecuaciones que quedan de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 19} \quad P_s = 3 \cdot \left( U_s \cdot \frac{690}{\sqrt{3}} \right) \cdot \left( I_s \cdot \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} \right) \cdot \cos \varphi_s$$

$$\text{Ec. 20} \quad P_r = 3 \cdot \left( \frac{U_r'}{s} \cdot \frac{690}{\sqrt{3}} \right) \cdot \left( I_r' \cdot \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} \right) \cdot \cos \varphi_r$$

Potencia reactiva:

$$\text{Ec. 21} \quad Q_s = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \text{sen} \varphi_s$$

$$\text{Ec. 22} \quad Q_r = 3 \cdot U_r' \cdot I_r' \cdot \text{sen} \varphi_r$$

De igual manera que en la potencia activa se transforman las ecuaciones para la reactiva:

$$\text{Ec. 23} \quad Q_s = 3 \cdot \left( U_s \cdot \frac{690}{\sqrt{3}} \right) \cdot \left( I_s \cdot \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} \right) \cdot \text{sen} \varphi_s$$

$$\text{Ec. 24} \quad Q_r = 3 \cdot \left( \frac{U_r'}{s} \cdot \frac{690}{\sqrt{3}} \right) \cdot \left( I_r' \cdot \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} \right) \cdot \text{sen} \varphi_r$$

V. viento	$P_s$ [pu]	$P_r$ [pu]	$P_T$ [pu]	$Q_s$ [pu]	$Q_r$ [pu]	$Q_T$ [pu]
15 m/s	1.2124	0.38356	1.5960	0	-0.01491	-0.01491
8 m/s	0.55426	0.101	0.655	0	0.06	-0.06

Tabla 11

En las siguientes gráficas obtenidas mediante la simulación se pueden ver tanto las potencias activas como las reactivas a 15 y 8 m/s. En azul se puede ver la potencia total transferida a la red, en rojo la generada por el estator y en verde la del rotor. Se puede así comprobar que los resultados obtenidos anteriormente en la Tabla 11 son coherentes con la simulación.

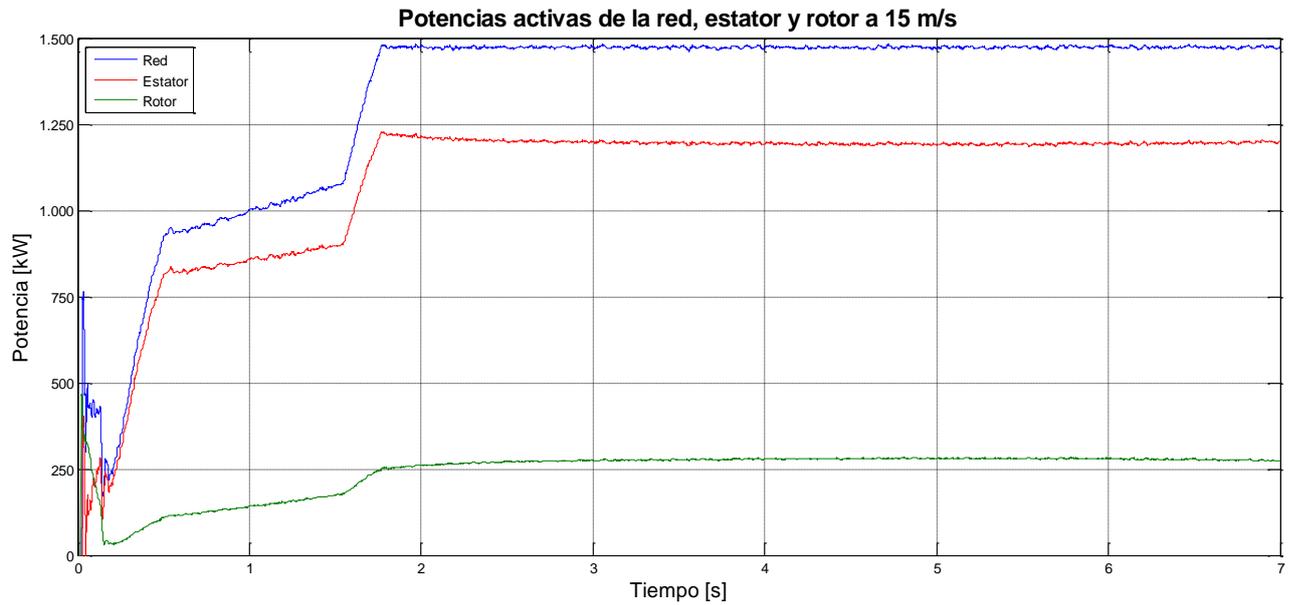


Figura 52 Potencias activas de la red, estator y rotor a 15 m/s

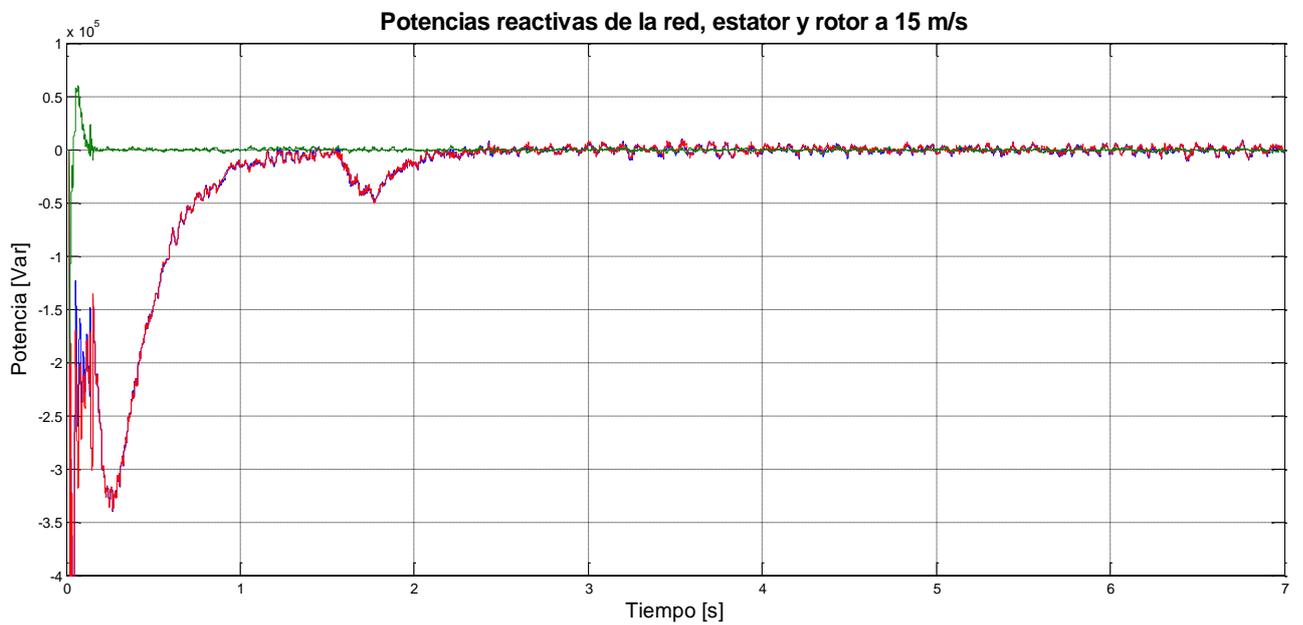
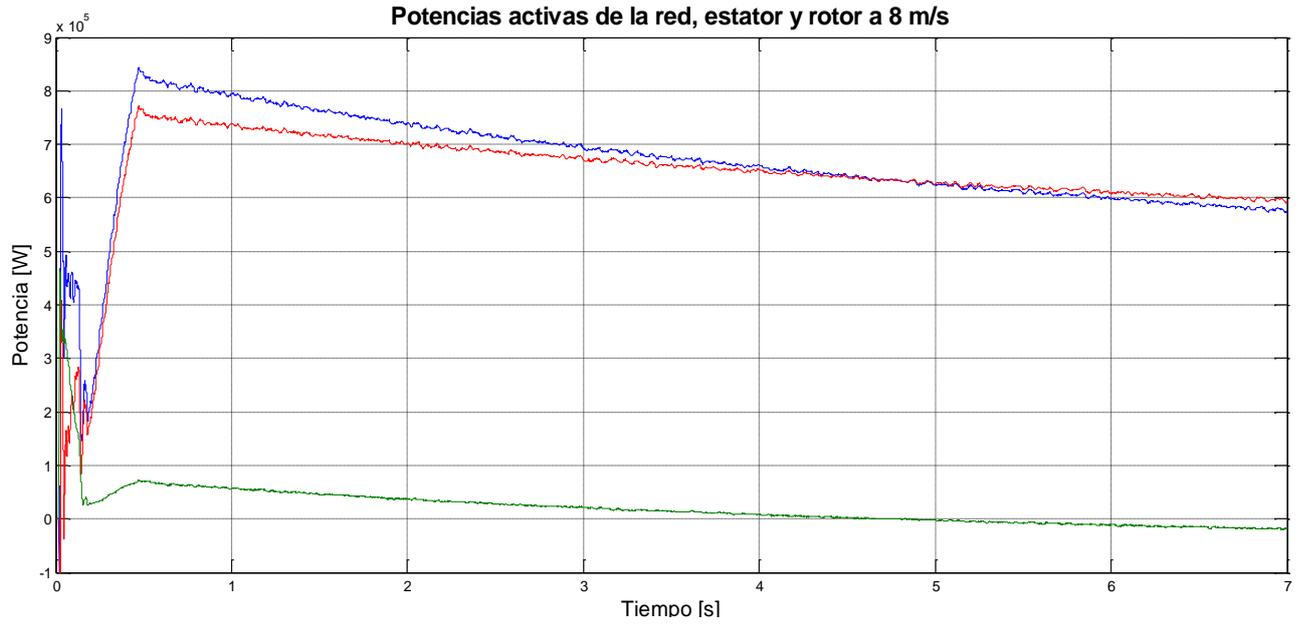
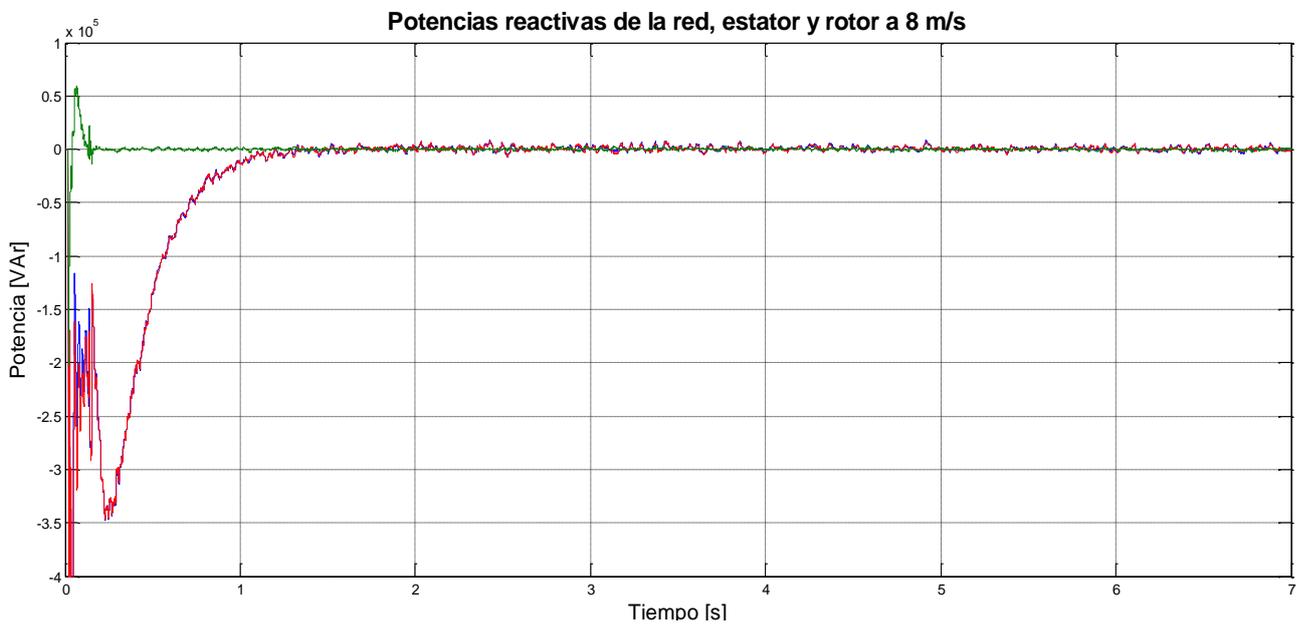


Figura 53 Potencias reactivas de la red, estator y rotor a 15 m/s



**Figura 54** Potencias activas de la red, estator y rotor a 8 m/s



**Figura 55** Potencias reactivas de la red, estator y rotor a 8 m/s



### 3 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO EN EL PARQUE EÓLICO

Intuitivamente se tiene la idea de que un cortocircuito es la alteración brusca de la configuración de un circuito eléctrico, asociada a la aparición de intensidades superiores a las que circulaban antes de producirse dicha alteración. Formalmente se produce un cortocircuito cuando dos o más puntos de un circuito se unen con un conductor de impedancia nula o muy baja. La aparición de corrientes asociadas dependerá de las tensiones existentes entre los puntos antes de efectuarse tal unión.

El cortocircuito es una de las mayores preocupaciones para los responsables de la explotación de la red eléctrica como para los propietarios del parque, ya que condiciona la tecnología a utilizar para el corte de la falta y el coste de la instalación.

Una de las utilidades de este modelo, y objetivo de este proyecto, es demostrar que puede aplicarse al dimensionado de las protecciones propias de un parque eólico, esto se debe a que el programa Simulink de Matlab puede simular cortocircuitos, fase-fase, fase-tierra, fase-neutro y trifásicos lo cual permite, situando los bloques y sistemas de medida adecuados, obtener los valores de las tensiones y las corrientes en cualquier punto y fase de la red y ver su evolución en el tiempo. Todo ello proporciona los datos necesarios para dimensionar las protecciones del parque eólico.

Para demostrar como el programa permite la obtención de estos datos se llevará a cabo una simulación con una velocidad del viento de 15 m/s sobre una adaptación del modelo del generador doblemente alimentado. Esta adaptación incluye, como se podrá observar en las siguientes figuras, la introducción de otro aerogenerador, siendo este idéntico al del modelo, para simular un parque eólico, adaptación de la red e introducción de diversos bloques con el fin de tomar medidas en puntos significativos del modelo.

La adaptación de la red (el modelado de la red inicial se puede ver en el punto 1 del anexo) tendrá como diferencia con el modelo de un solo generador doblemente alimentado la eliminación de la carga de 82 kW y el filtro capacitivo resistivo que se situaban delante de transformador de media tensión. Ahora estas cargas y los filtros se sitúan en bornes de cada aerogenerador, entre cada generador y el nudo de conexión se sitúa un modelo  $\pi$  de línea de 500 m de longitud, que simulará las líneas hasta la subestación de media tensión.

Se simulará un cortocircuito trifásico y se tratará de mostrar una utilidad adicional de este programa para los modelos desarrollados y no se realizará cálculo alguno de protecciones. El cortocircuito trifásico resulta, en la mayor parte de los casos, el de mayor severidad.

El cortocircuito tendrá lugar a los 2 segundos de comenzar la simulación y tendrá una duración de 0,07 segundos. En la Figura 56 puede verse como se configura el cortocircuito puede señalarse las fases a las que afecta, si el cortocircuito va a ser entre fases o a tierra, el tiempo de inicio del cortocircuito así como su duración. También se selecciona el valor de la resistencia de tierra y de falta, así como la resistencia y capacidad de los snubbers.

## Características del cortocircuito simulado

- Se produce en el segundo 2 de la simulación, durante un funcionamiento estable del sistema
- Duración de 0,07 segundos
- Cortocircuito trifásico a tierra
- Resistencia de tierra 0,001 ohms
- Resistencia de falta 0,001 ohms
- Snubbers, desactivados

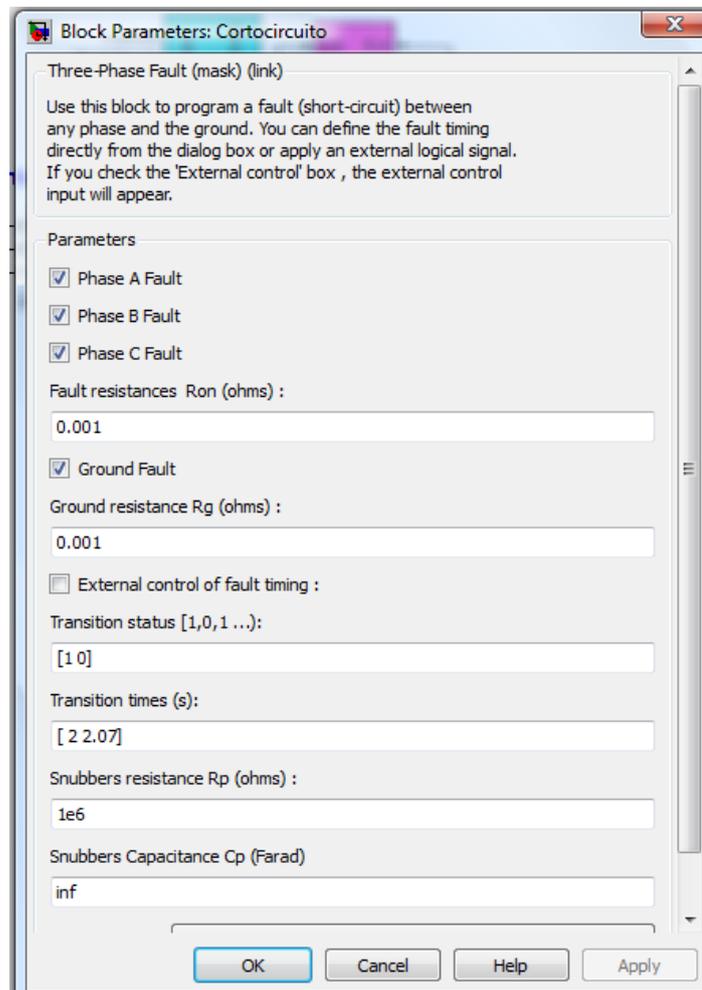


Figura 56 Configuración del cortocircuito en el modelo

### 3.1 Modelo creado para la simulación

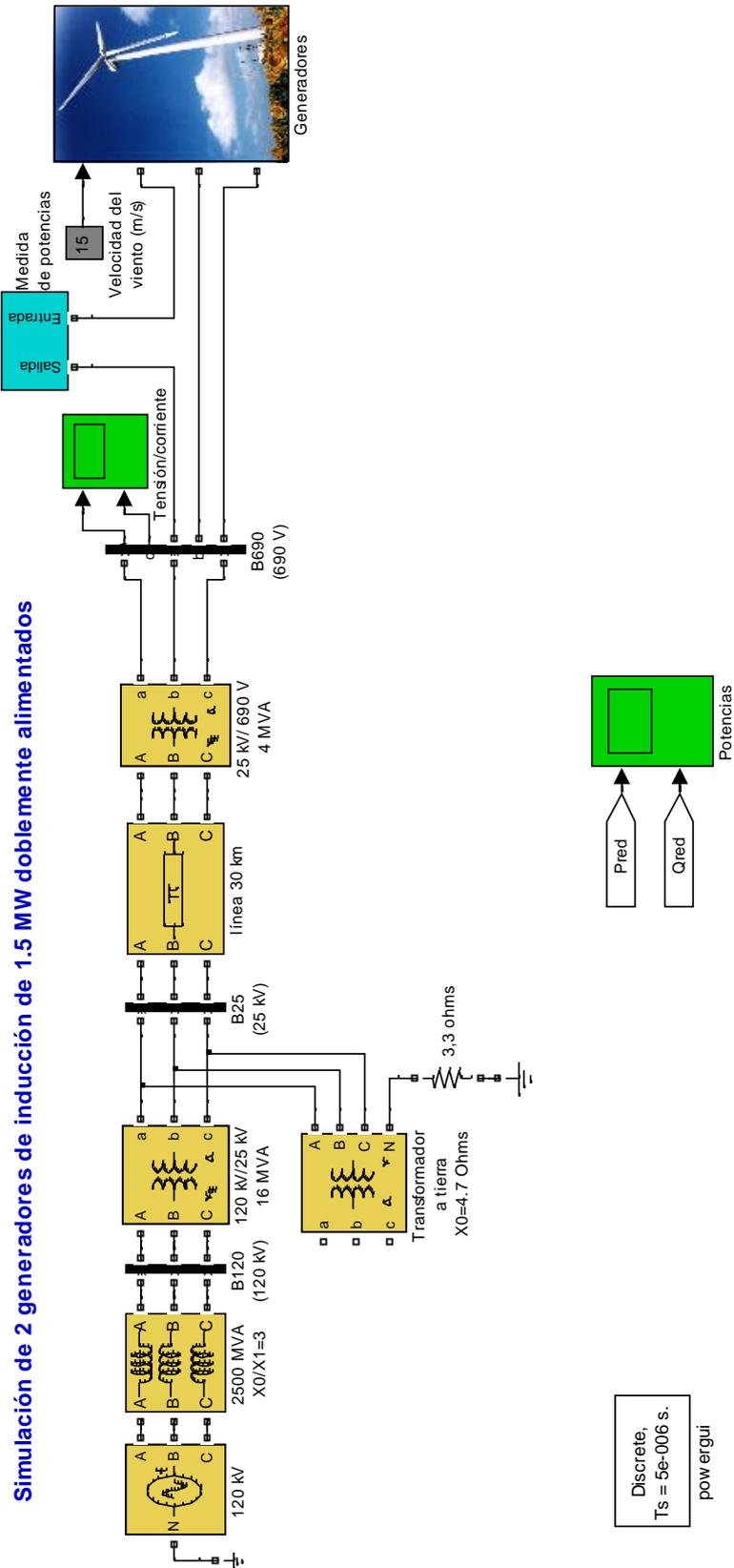
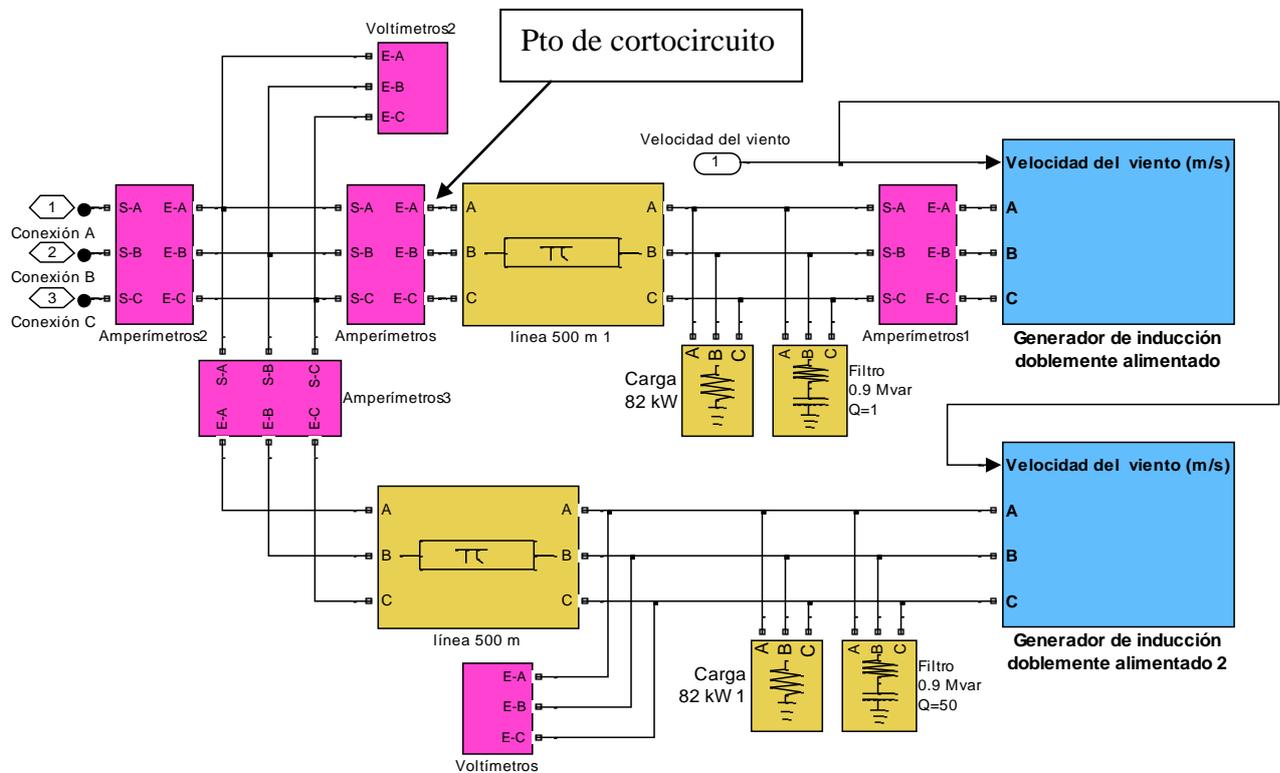


Figura 57 Modelo con cuatro generadores directamente conectados a la red

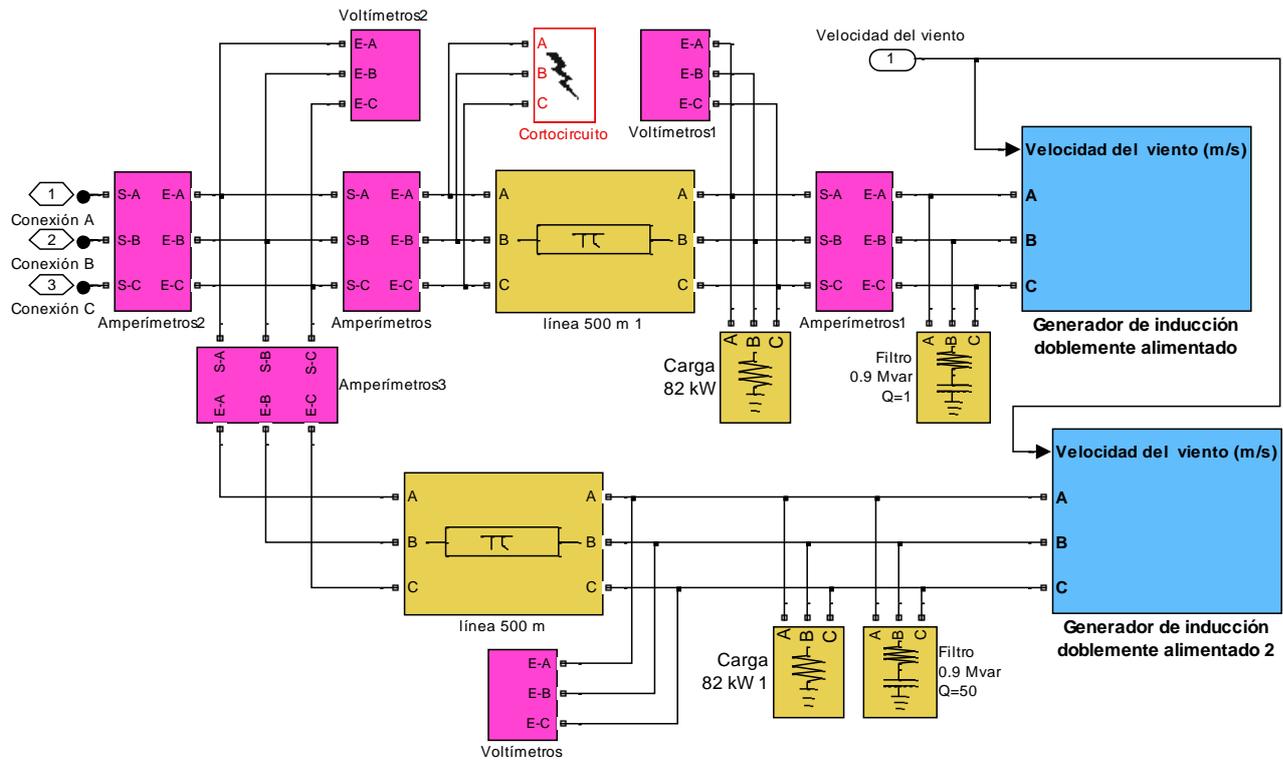
Van a existir varias aportaciones al cortocircuito:

- 1- La de la propia red desde la acometida.
- 2- La del generador situado en la línea que sufre el cortocircuito.
- 3- La de los generadores conectados en paralelo.

En la siguiente figura pueden verse las adaptaciones específicas para esta simulación tanto de bloques de medida como de parte de la red.



**Figura 58** Subsistema con dos generadores de inducción doblemente alimentados sin cortocircuito

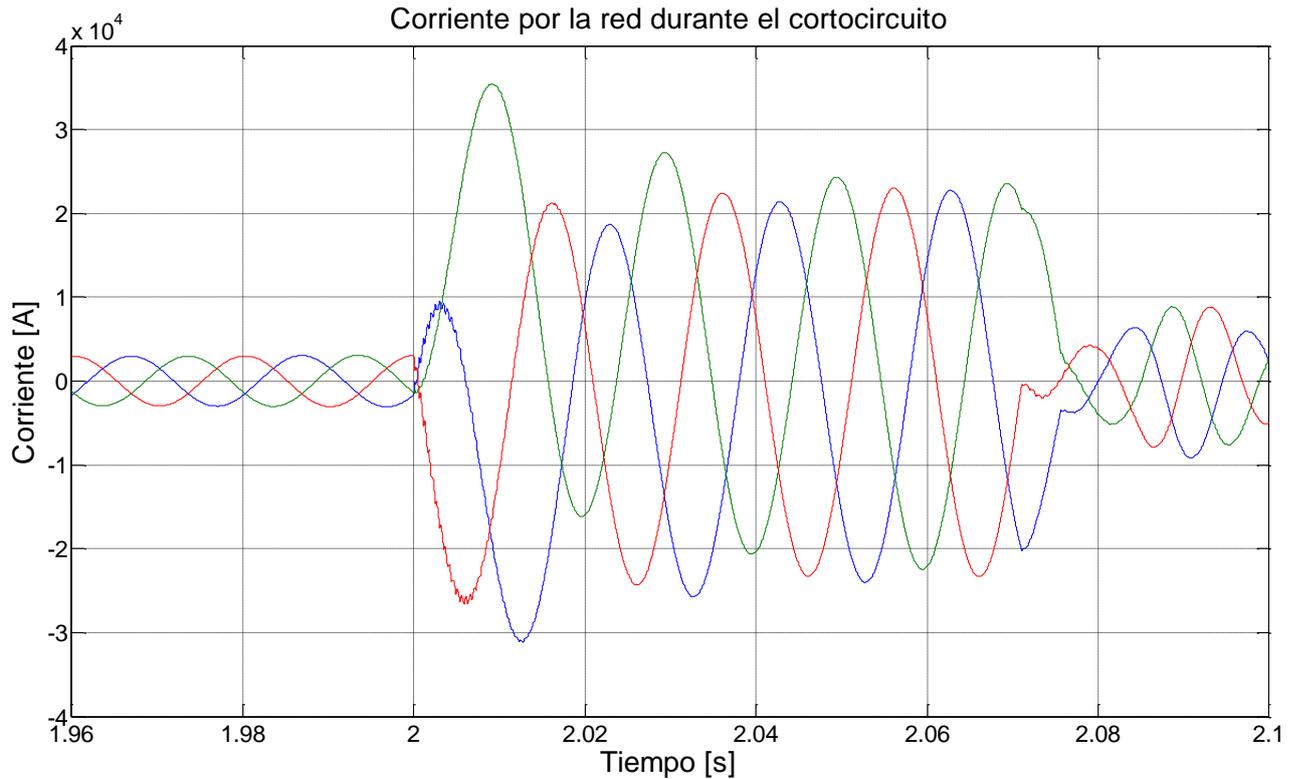


**Figura 59** Subsistema con dos generadores de inducción doblemente alimentados con cortocircuito

A continuación se muestran una serie de gráficos en los que se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones por los bloques de medida, en los casos más interesantes se muestran de manera consecutiva los resultados obtenidos en ausencia y en presencia de cortocircuito para poder comparar de una forma más sencilla lo que ocurre durante el cortocircuito.

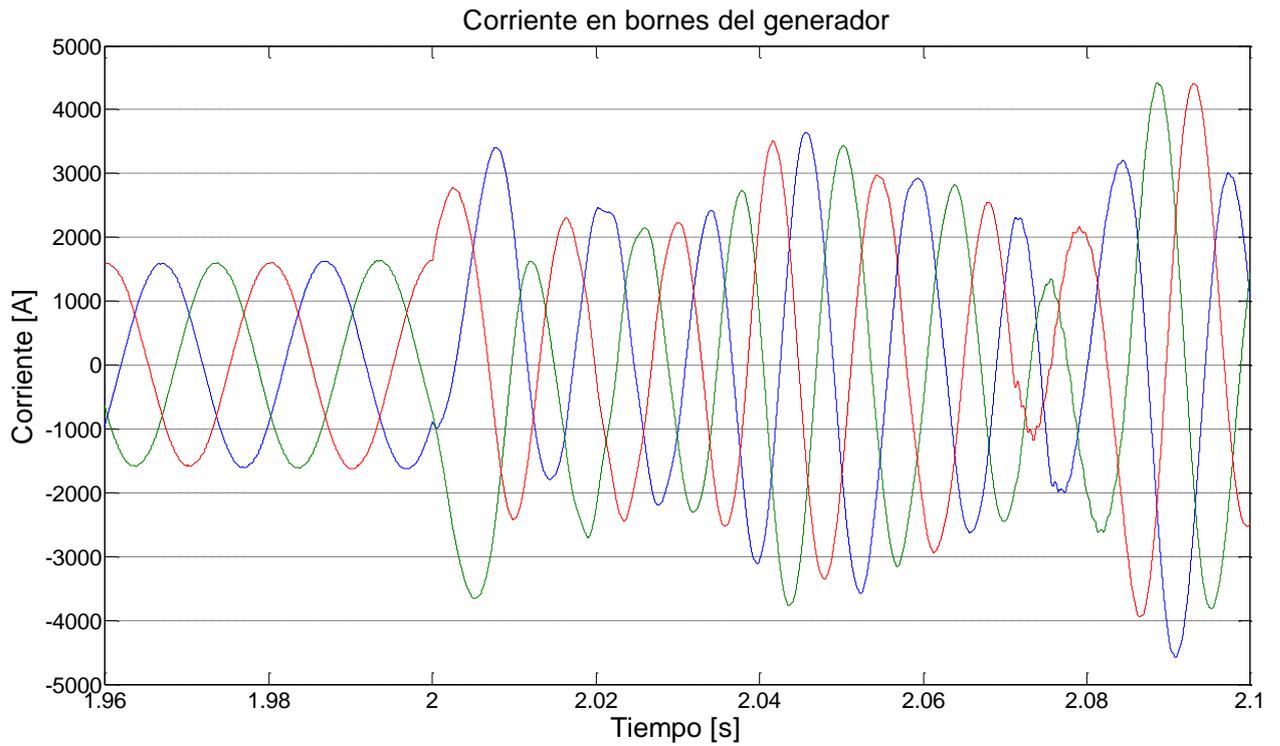
Estos gráficos permiten tomar datos de los valores alcanzados por corrientes y tensiones, frecuencias y tiempos con gran detalle.

En el siguiente gráfico, Figura 60, se puede observar como la corriente que circula por la red alcanza un valor máximo de 35000 A 0,01 segundos después de que se inicie el cortocircuito, cuando en ausencia de este se tienen 3000 A esto supone un incremento de la corriente de 11,6 veces la corriente nominal.

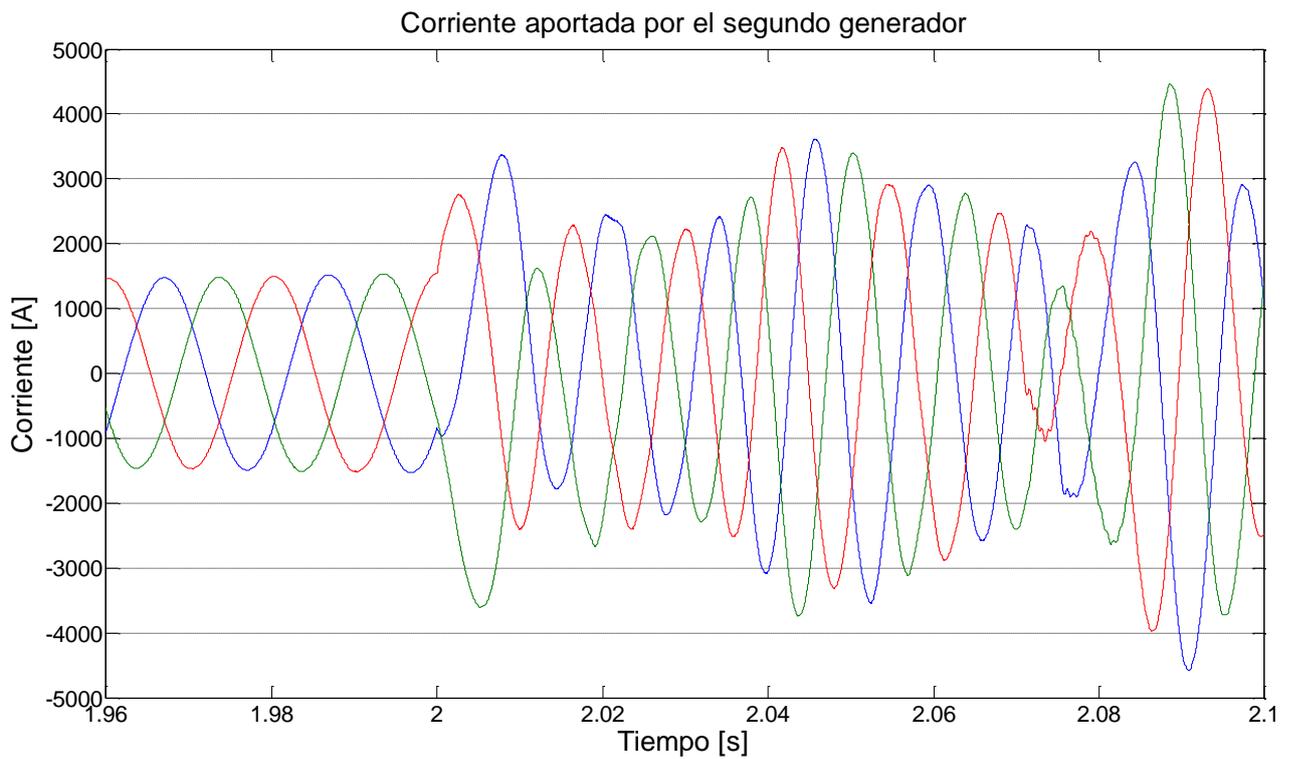


**Figura 60** Corriente por la red durante el cortocircuito trifásico

La corriente en bornes del generador que sufre el cortocircuito, como es lógico, también se ve afectada, en este caso la corriente llega a multiplicarse por 3, lo interesante es que esto se produce fuera del cortocircuito, debido a que el cortocircuito desestabiliza el control de los convertidores y tarda un tiempo largo en volver a estabilizarse a los valores de funcionamiento estable. Esto tampoco es demasiado relevante, debido a que en la realidad ante un cortocircuito las protecciones del generador actuarían y al volver a conectarlo el proceso empezaría desde cero.

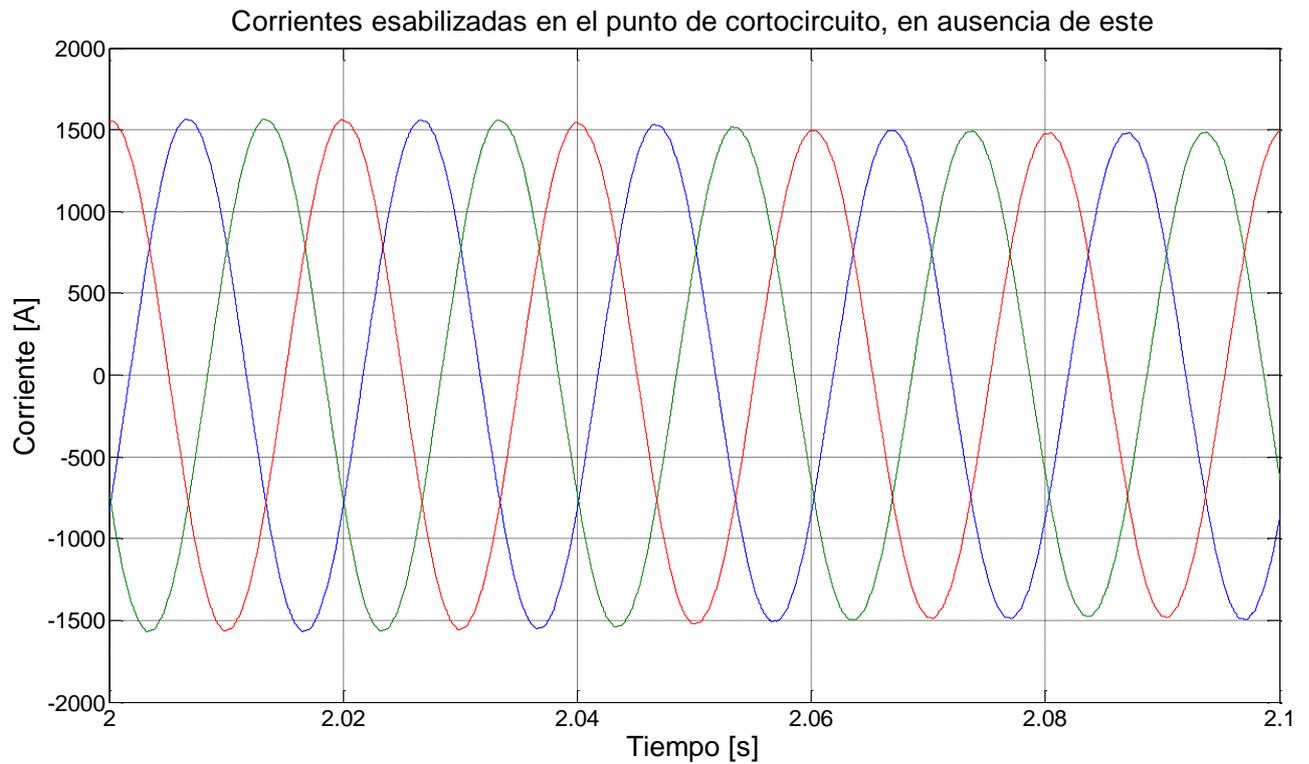


**Figura 61** Corriente en bornes del generador durante el cortocircuito trifásico

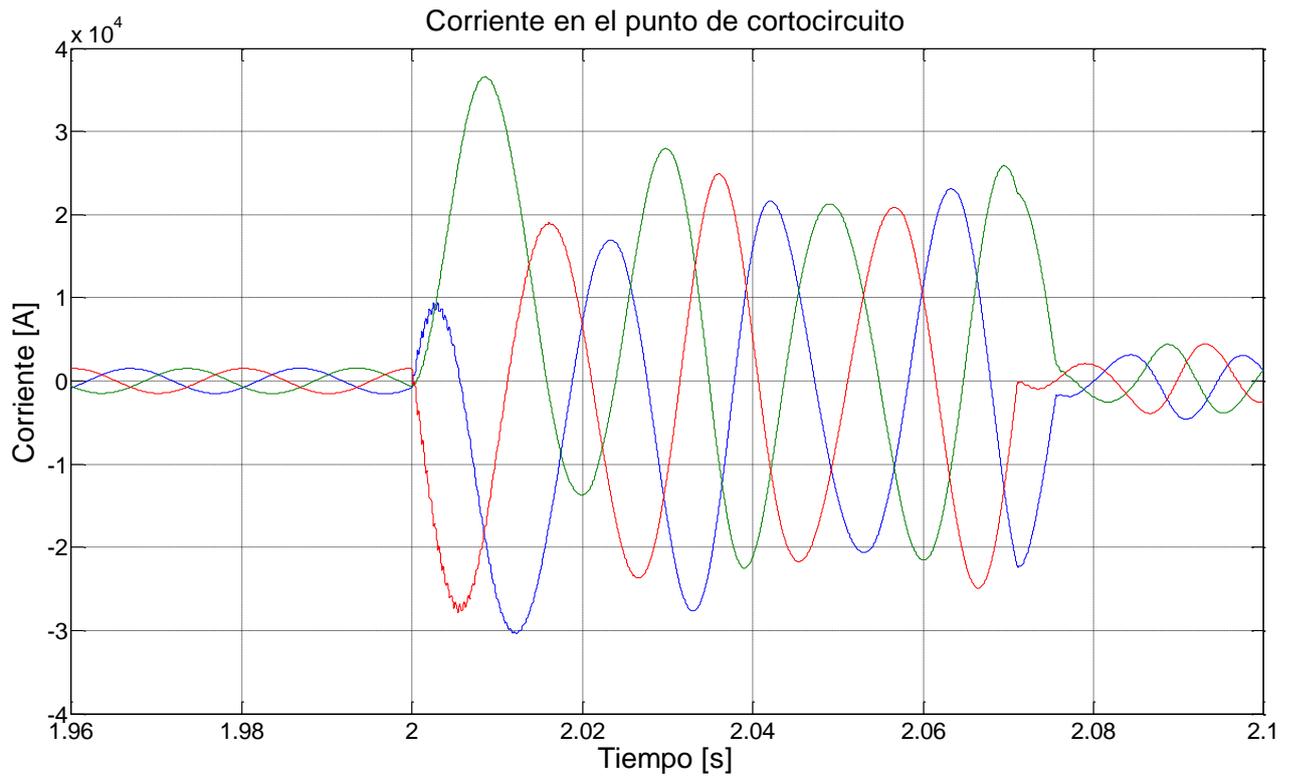


**Figura 62** Corriente aportada por el generador en paralelo al cortocircuito trifásico

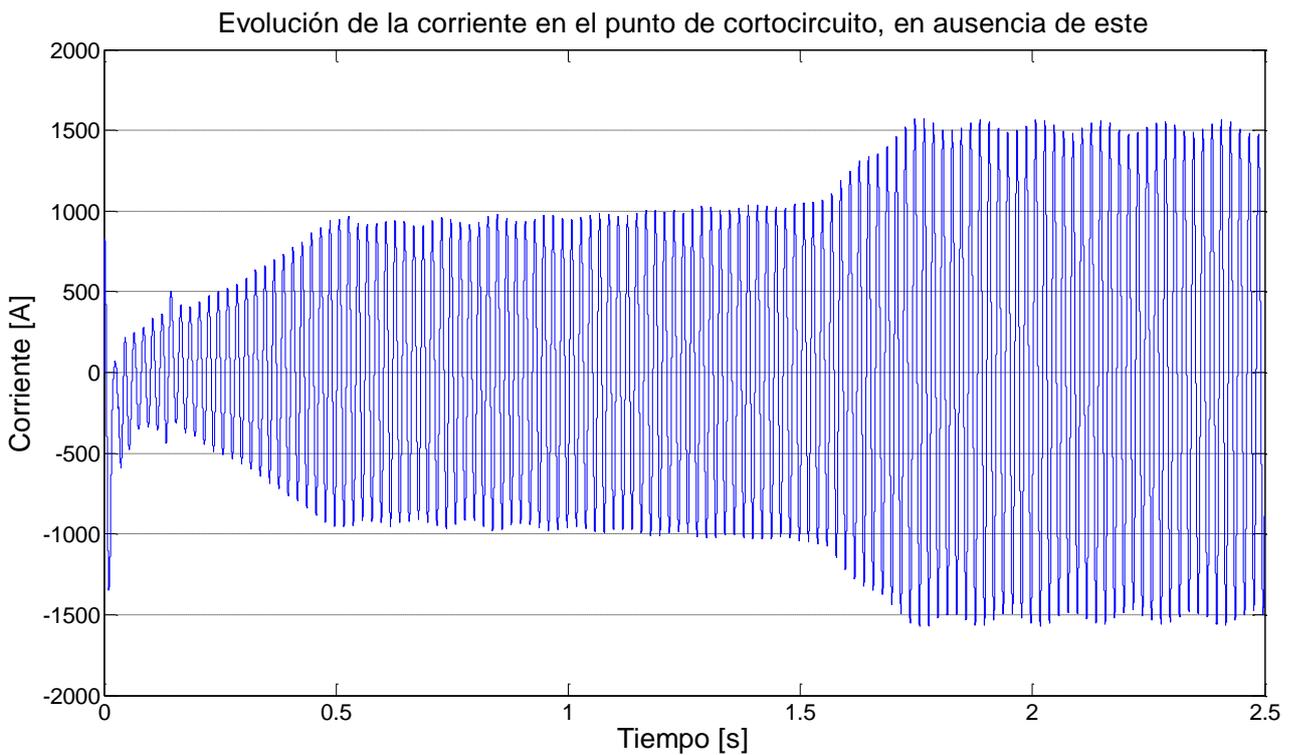
En los siguientes gráficos, Figura 63 y Figura 64, se puede observar como la corriente en el punto de cortocircuito alcanza un valor máximo de 35000 A 0,01 segundos después de que se inicie el cortocircuito, cuando en ausencia de este se tienen 1500 A esto supone un incremento de la corriente de 23,3 veces la corriente nominal.



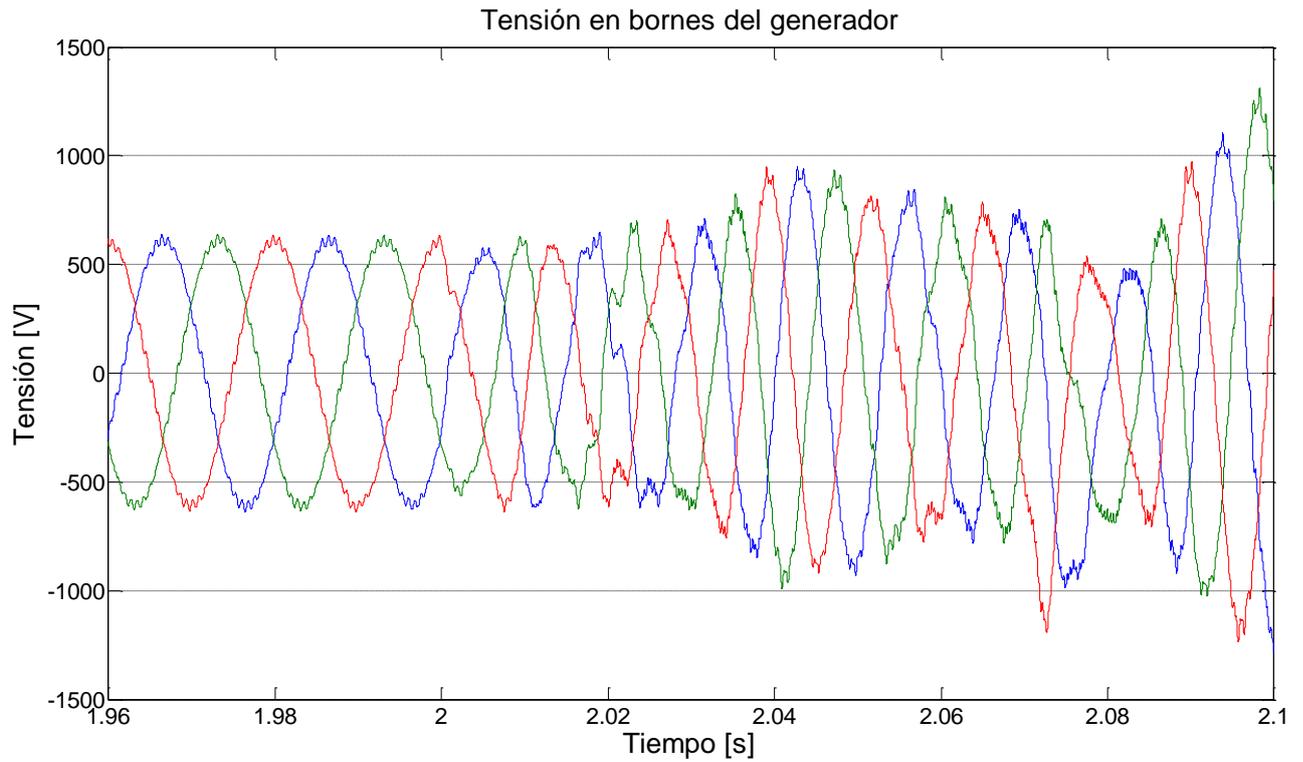
**Figura 63** Corriente en el punto de cortocircuito trifásico en ausencia de éste



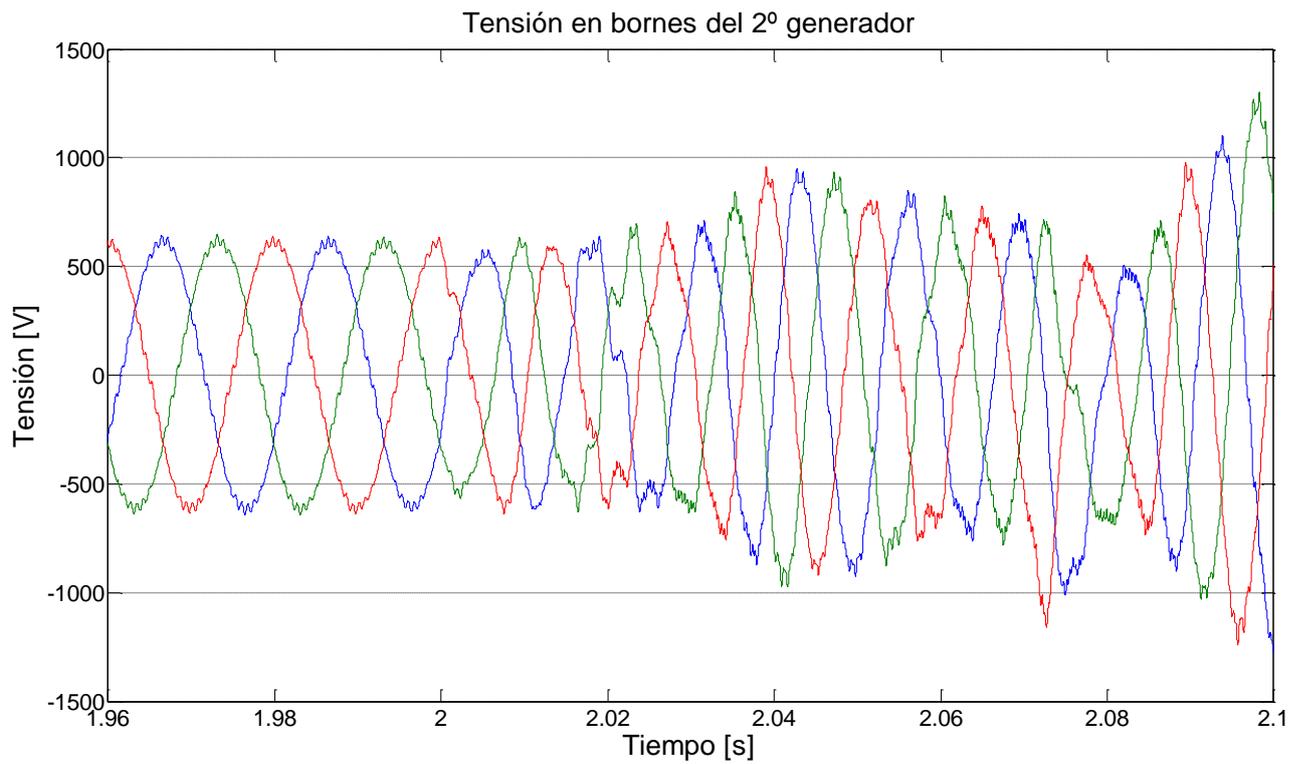
**Figura 64** Corriente en el punto del cortocircuito trifásico



**Figura 65** Evolución de la corriente en el punto de cortocircuito desde la puesta en marcha de los aerogeneradores, en ausencia de cortocircuitos



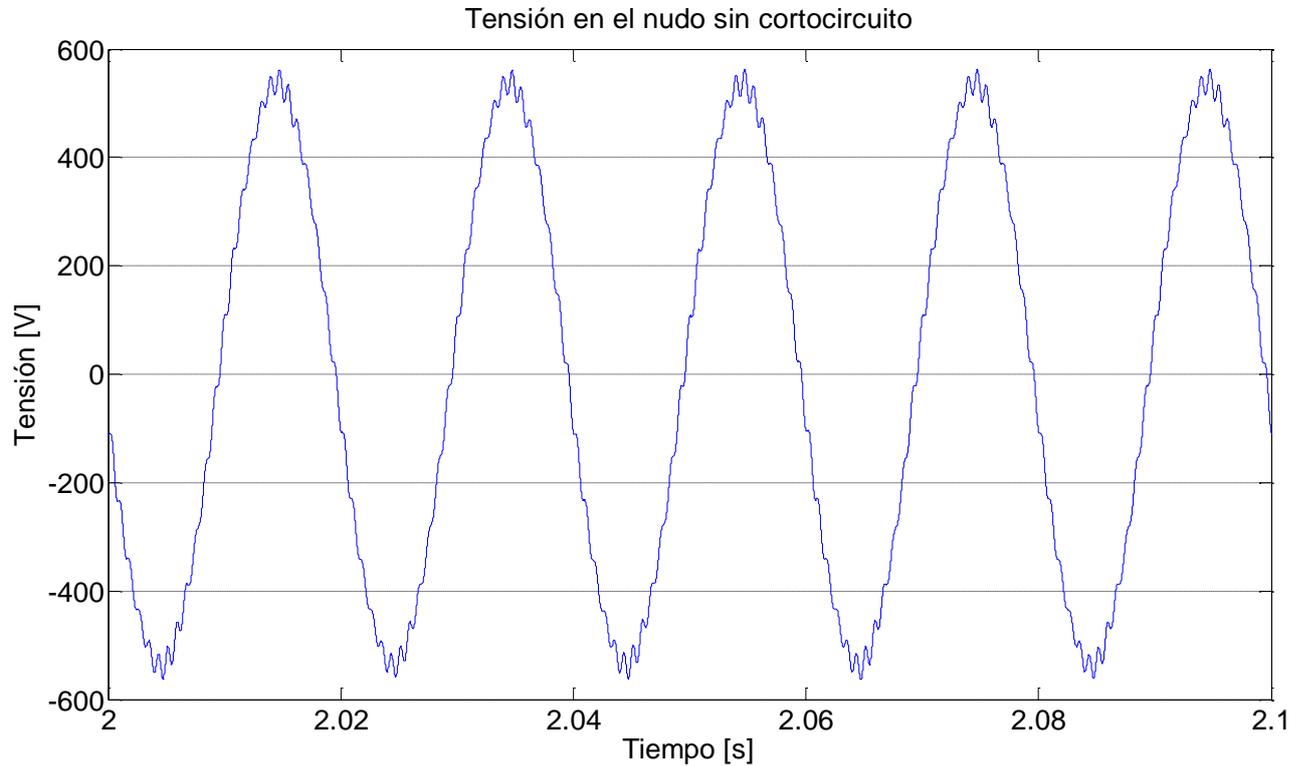
**Figura 66** Tensión en bornes de un generador durante el cortocircuito trifásico



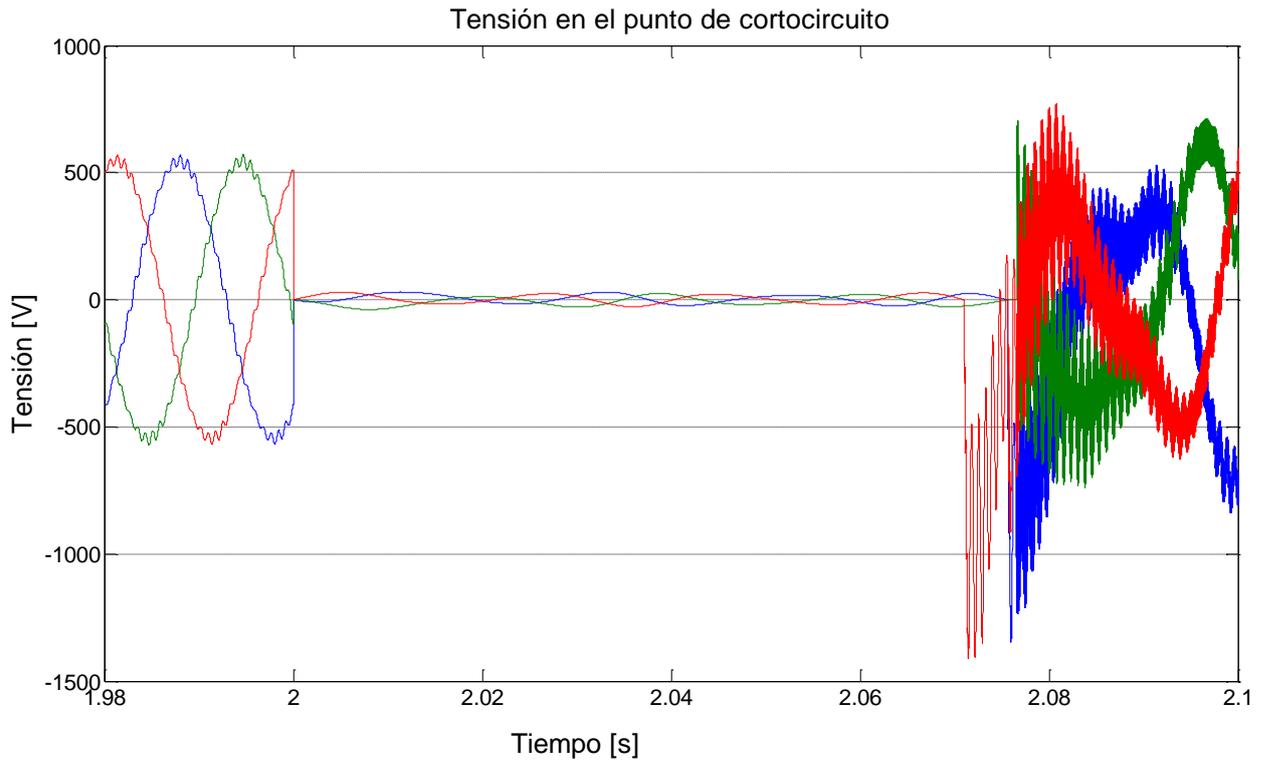
**Figura 67** Tensión en bornes del 2º generador en paralelo



En los siguientes gráficos, Figura 68 y Figura 69, se puede observar cómo se produce una caída de la tensión en el nudo de unión de los generadores consecuencia del cortocircuito, esta caída es inmediata según se produce el cortocircuito y tiene un valor 18 veces menor que el valor de la tensión nominal.

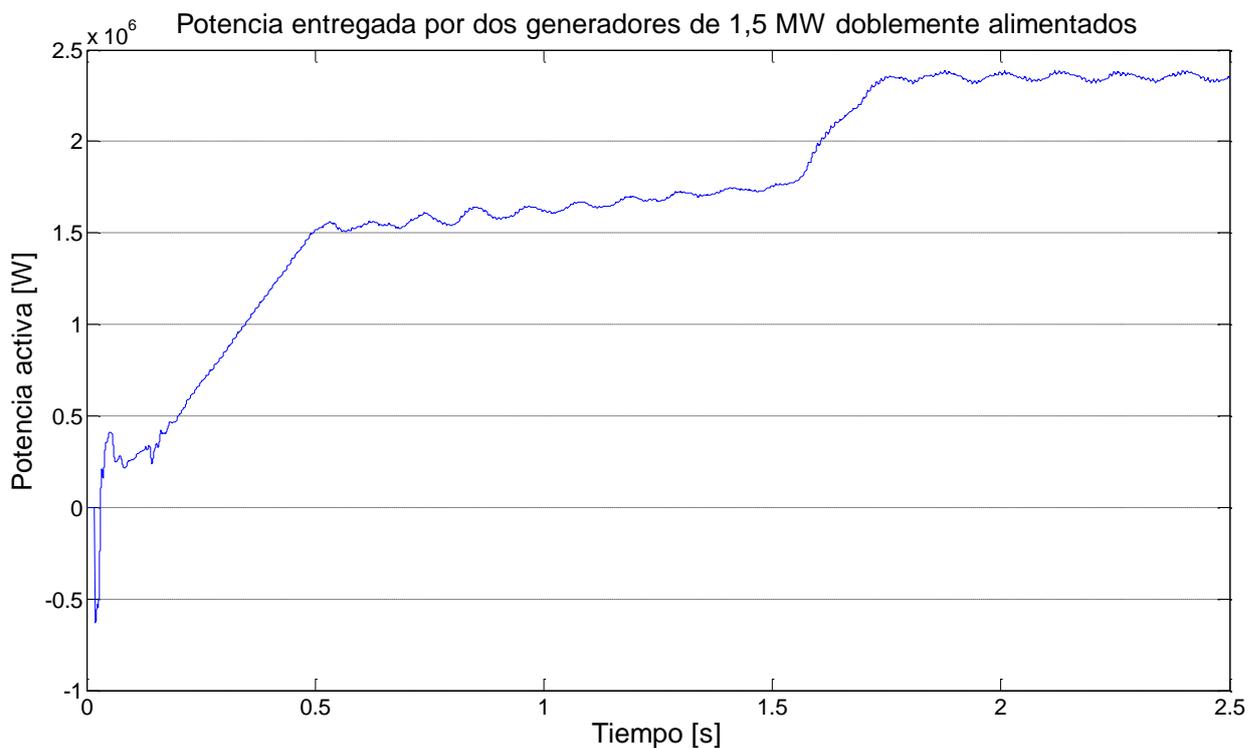


**Figura 68** Tensión en el nudo sin cortocircuito

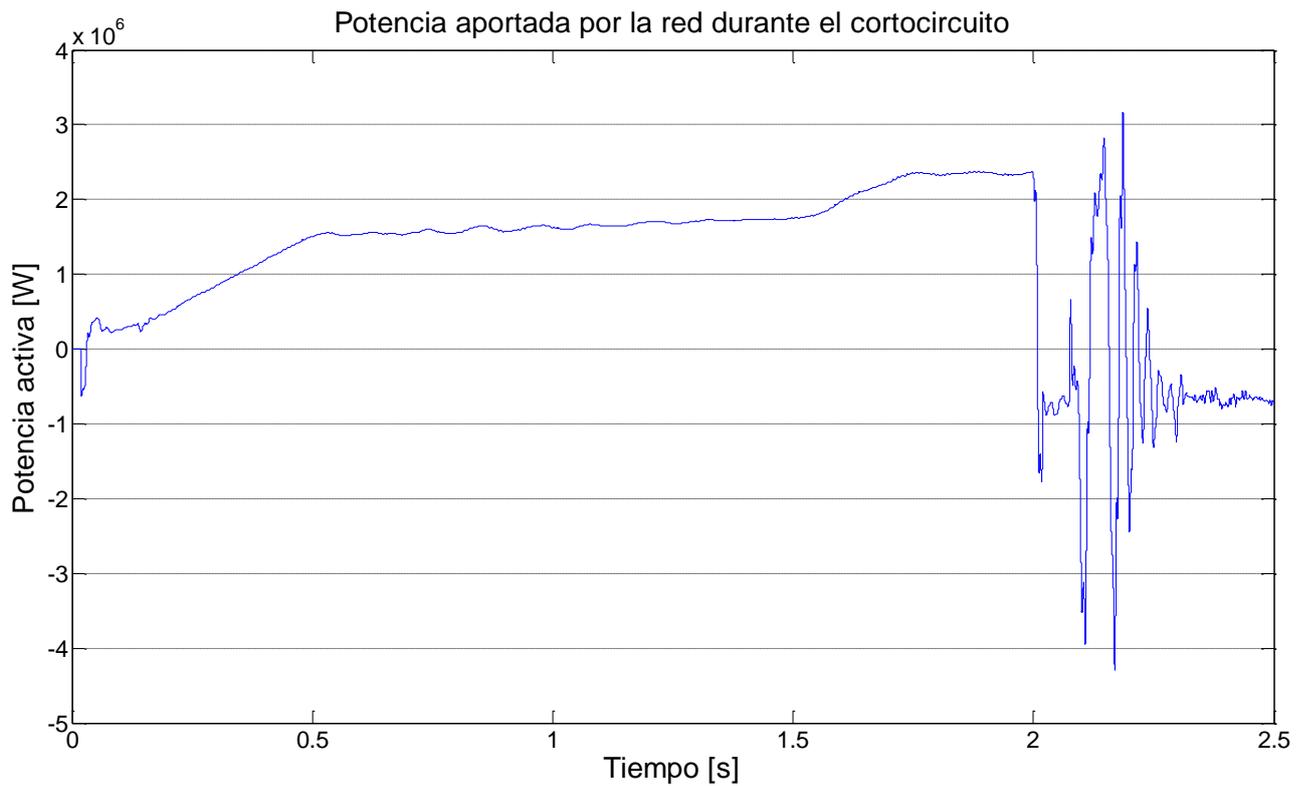


**Figura 69** Tensión en el nudo durante el cortocircuito trifásico

También se puede ver el impacto de un cortocircuito en la generación de potencia activa viendo como la red aporta potencia al cortocircuito.



**Figura 70** Evolución de la potencia activa en ausencia de cortocircuito



**Figura 71** Evolución de la potencia activa en caso de cortocircuito trifásico

También se puede ver el impacto de un cortocircuito en la potencia reactiva, viendo como se pasa de consumir potencia reactiva de la red sin cortocircuito a consumir del orden de 10 veces más en los instantes iniciales y finales del cortocircuito a incluso aportar potencia reactiva a la red en la mitad del cortocircuito.

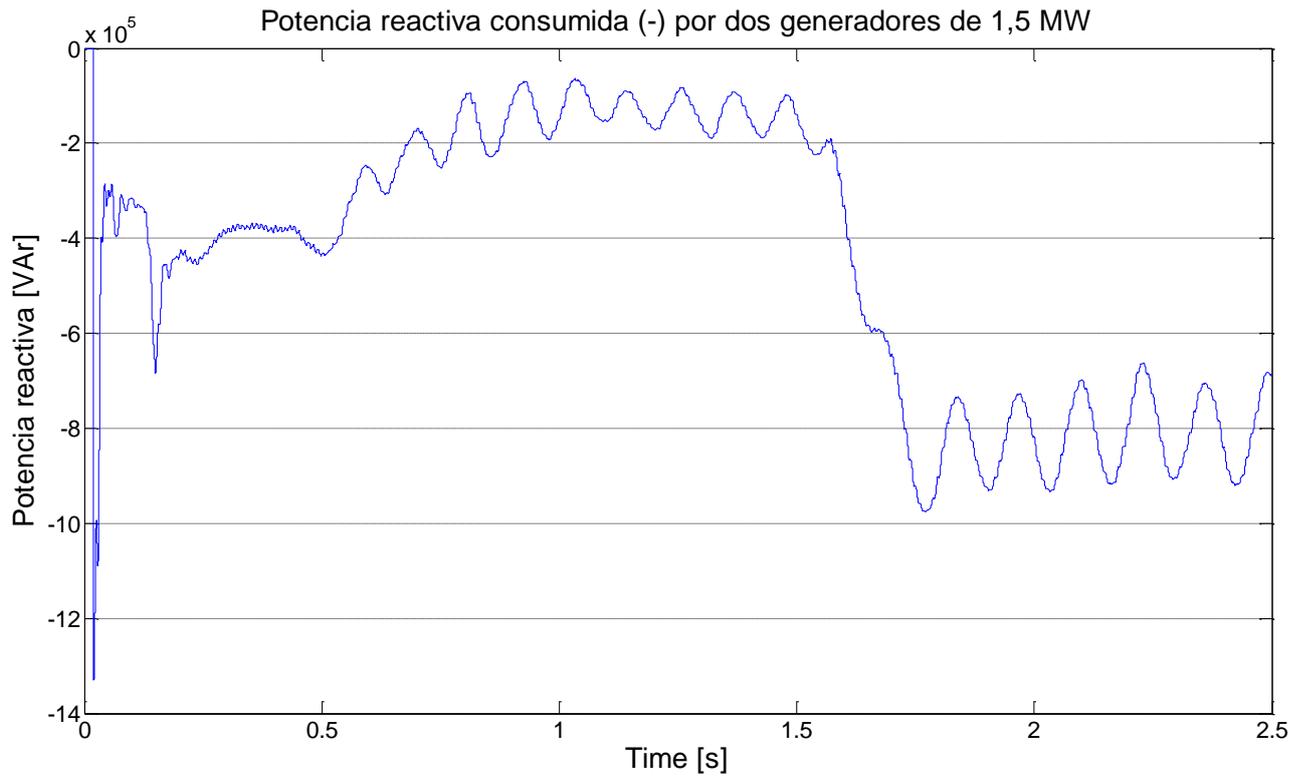


Figura 72 Potencia reactiva consumida por los dos generadores sin cortocircuito

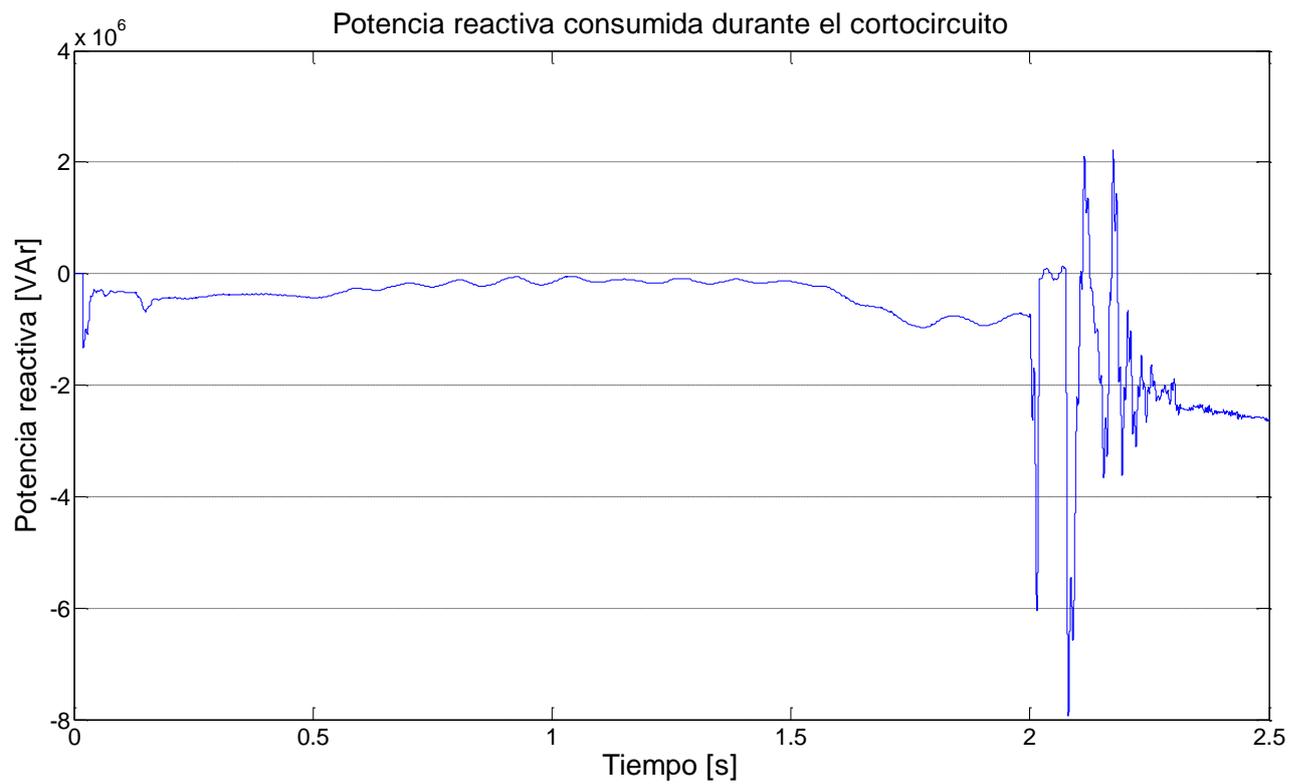


Figura 73 Potencia reactiva consumida por los dos generadores con cortocircuito



## 4 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto se han modelado uno de los esquemas de potencia y control más frecuentes en los parques eólicos actuales, los doblemente alimentados.

Sobre este modelo se han simulado diferentes condiciones de funcionamiento prestando especial atención a la influencia sobre el balance de potencias activa y reactiva. Balance que tiene una clara influencia sobre la rentabilidad de la producción de energía eléctrica. En cualquier caso, la flexibilidad de los modelos desarrollados con Simulink han permitido realizar un seguimiento de diferentes variables mecánicas (par y velocidad) eléctricas (tensiones, corrientes y potencias) y de control.

Se ha desarrollado un modelo para un aerogenerador de inducción de 1,5 MW modelo del fabricante GEWE. Durante la realización de este proyecto se ha analizado el generador de inducción doblemente alimentado mediante simulación y mediante un análisis del circuito equivalente, realizando también un estudio de las potencias activas producidas y de las potencias reactivas consumidas. Así mismo se ha ahondado en las particularidades de este tipo de control

Como punto final se ha llevado a cabo un ensayo de cortocircuito en un parque eólico partiendo del modelo anteriormente creado y se ha analizado en él la posibilidad de ser utilizado para el dimensionado de las protecciones del parque.

### 4.1 Conclusiones

El control de los generadores eólicos dista mucho de ser sencillo y depende a su vez del tipo de generador, el caso estudiado en este proyecto es tan sólo uno de los tipos de aerogeneradores presentes en los parques eólicos. Existen otras topologías de control y otro tipo de máquinas eléctricas. Sin embargo, el aquí estudiado se ha elegido por ser uno de los más utilizados a lo largo de estos últimos años y porque lo seguirá siendo previsiblemente en el futuro debido a las ventajas que presenta.

Es evidente que los generadores de igual potencia tienen un comportamiento diferente dependiendo del tipo de control, ya sea en velocidad de trabajo, producción de energía activa, consumo de reactiva, etc. Los parques eólicos se instalan con un objetivo principal, el económico, por lo cual lo que se quiere maximizar es la producción de potencia activa, lo cual se puede realizar con el generador doblemente alimentado. Al comparar este tipo de generador con otros, se puede ver que la inyección de potencia activa a la red es mayor con velocidades del viento medias y bajas, siendo esta diferencia más notable a bajas velocidades, aunque cuando la velocidad del viento supera la nominal la inyección de potencia activa es similar. Pero tampoco se puede dejar de lado el consumo de reactiva ya que esto penaliza tanto técnica como económicamente.

La facilidad que se tiene para controlar a voluntad en cualquier momento el consumo de potencia reactiva que tiene en generador doblemente alimentado, sin duda, le otorga una gran ventaja frente a los sistemas de velocidad fija. Estos últimos a su vez tienen un problema añadido en caso de realizar la compensación de reactiva mediante un banco de condensadores por escalones, ya que por muchos escalones que tenga dicho banco nunca podrá llegar a ser eficaz en todos los puntos en los que puede trabajar el aerogenerador, además el incremento del número de escalones supone incrementar conjuntamente el precio de la instalación.



Al realizar el ensayo de cortocircuito con el modelo, se puede ver de una forma rápida los valores que alcanza la intensidad en el punto que deseamos, y se puede ver así mismo la evolución de esta. Esto permite realizar un dimensionado de las protecciones óptimo, sabiendo cual será el efecto de un determinado tipo de cortocircuito en cualquier punto de la red del parque.

Así mismo, partiendo del modelo creado en el presente proyecto como base sería posible realizar una serie de estudios muy interesantes para el análisis del comportamiento de las distintas configuraciones presentes en los parques eólicos. Con este modelo de aerogenerador se podría hacer un estudio del impacto de subidas de tensión, huecos de tensión, dimensionado de protecciones, o un análisis detallado de la compensación de reactiva a través de un Statcom, haciendo un estudio de los controles del mismo y de su impacto en caso de que se produzca un hueco de tensión.

El Matlab es una poderosa herramienta que permite simular cualquier máquina siempre que se conozcan los parámetros y las ecuaciones que lo gobiernan. Por ello resulta muy útil a la hora de llevar a cabo estudios sin necesidad de utilizar aparatos y sin necesidad de disponer de la máquina objeto del estudio.

# **ANEXO**



## INDICE ANEXO

1. CONTENIDO .....	2
2. MODELADO DE LA RED .....	2
3. MODELADO DEL PAR .....	9
3.1. Estimación de la densidad del aire.....	9
3.2. Cálculo del coeficiente de potencia $C_p$ .....	11
3.3. Implementación en el modelo.....	13
4. CONTROL DE PASO DE PALA .....	17
5. CONTROL DE LOS CONVERTIDORES .....	20
5.1. Sistema de control del convertidor del lado de la red.....	24
5.2. Sistema de control del convertidor del lado del rotor.....	35
6. MEDIDA DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA .....	54
6.1. Límites de distorsión armónica en voltaje.....	55
6.2. Límites de distorsión armónica en corriente.....	57
7. BIBLIOGRAFÍA .....	59
8. REFERENCIAS (Bibliográficas y de Internet) .....	60
9. PLANIFICACIÓN .....	61
9.1. Desglose de la planificación .....	61
9.2. Duración de las tareas.....	62
9.3. Calendario de ejecución de las tareas .....	63



## 1. CONTENIDO

En el anexo se explicarán algunos elementos necesarios para la elaboración del proyecto que debido a su extensión no pueden incluirse en la memoria.

El primero de estos elementos es el modelado de la red, necesaria para la inyección de la potencia generada. Otro aspecto muy importante es la captación de la energía cinética del viento a través del modelado del par que esta energía provoca en el aerogenerador y la adaptación de ángulo de paso de pala ante las distintas velocidades del viento, control del paso de pala. Y por último el control de los convertidores, donde se detallan todos los elementos que intervienen en el control de los convertidores de un generador doblemente alimentado.

También se incluye un breve estudio de la distorsión armónica, que aunque no es objeto de estudio fundamental de este proyecto, es interesante realizarlo debido a que el tipo de generador estudiado tiene convertidores, que son una de las mayores fuentes de introducción de armónicos en la red eléctrica.

Se incluyen así mismo la bibliografía y referencias utilizadas para poder llevar a cabo un correcto análisis del generador y su modelo, además de lo necesario para poder elaborar los documentos que componen este proyecto.

Como punto final se incluye la planificación del proyecto, que marca las pautas que se han seguido durante la realización del mismo y que servirá para la elaboración del presupuesto.

## 2. MODELADO DE LA RED

En el apartado 2.1 de la memoria se puede ver el modelo creado para simular el aerogenerador doblemente alimentado. Se comenzará con los bloques creados para simular la red a la que se conectará el aerogenerador, se trata de una red de frecuencia igual a 50 Hz. Comenzando de izquierda a derecha se tienen bloques que van a simular los siguientes elementos:

- Una fuente de tensión trifásica de 120 kV con neutro conectado a tierra. Los parámetros de esta fuente de tensión se muestran a continuación, Figura 1:

Parameters	
Positive-sequence:	[ Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz) ]
	120e3 0 50
Time variation of:	Amplitude
Type of variation:	Table of time-amplitude pairs

Figura 1 Parámetros fuente de tensión

- Una impedancia R-L (resistencia-inductancia) dados en valores por unidad 0,1 y 1 respectivamente y referidos a la impedancia base, obtenida esta a partir de la potencia de cortocircuito que es de 2500 MVA estimada en ese punto de la red a la tensión nominal de 120 kV. Los parámetros de esta inductancia se muestran a continuación, (se han incorporado las componentes de secuencia de las impedancias),Figura 2:

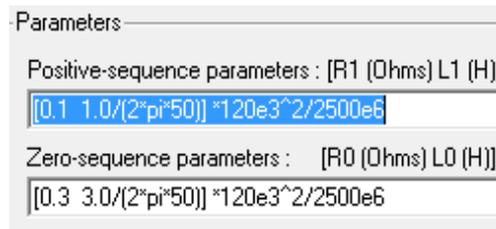


Figura 2 Parámetros impedancia

- Un transformador también trifásico de 8 MVA con conexión Yg-d, que pasa de 120 kV a 25 kV. Los parámetros de este transformador se muestran a continuación, Figura 4, después de una breve explicación de cómo se obtendrían a partir de los datos de la placa de características de un transformador:

En la placa de características de un transformador se dan la potencia aparente, tensiones en el primario y el secundario así como los valores las tensiones de cortocircuito relativas  $u_{cc}(\%)$  y  $u_{Rcc}(\%)$ . A partir de las siguientes ecuaciones, se pueden sacar los valores de la impedancia de primario y secundario juntas:

$$\text{Ec. 1} \quad u_{cc}(\%) = \frac{U_{cc}}{U_{1N}} \cdot 100$$

$$\text{Ec. 2} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

$$\text{Ec. 3} \quad u_{cc}(\%) = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \cdot 100$$

$$\text{Ec. 4} \quad u_{Rcc}(\%) = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \cdot 100$$

$$\text{Ec. 5} \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

$$\text{Ec. 6} \quad u_{Xcc}(\%) = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \cdot 100$$

En el proyecto se supone que la resistencia (de primario y secundario) tiene la siguiente relación respecto a la inductancia:

$$\text{Ec. 7} \quad R = \frac{L}{30}$$

Por tanto a la vista del circuito equivalente para sacar datos acerca de la resistencia y de la reactancia de magnetización se deberían tener datos acerca del ensayo de vacío del transformador. Con esos datos se tendría:



$$\text{Ec. 8} \quad R_m = \frac{V_1^2}{P_0}$$

$$\text{Ec. 9} \quad X_m = \frac{V_1}{I_m}$$

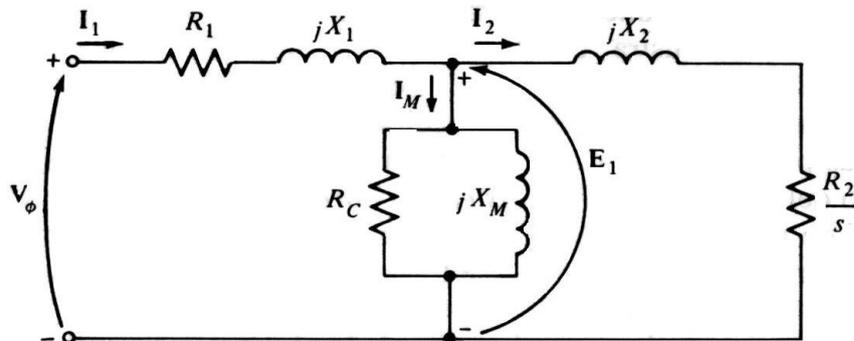


Figura 3 Circuito equivalente del transformador

Parameters	
Units	pu
Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ]	[8e6 50]
Winding 1 (ABC) connection :	Yg
Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]	[ 120e3 0.08/30 0.08 ]
Winding 2 (abc) connection :	Delta (D1)
Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]	[ 25e3 0.08/30 0.08 ]
<input type="checkbox"/> Saturable core	
Magnetization resistance Rm (pu)	500
Magnetization reactance Lm (pu)	500

Figura 4 Parámetros transformador 8 MVA

- Un transformador también trifásico de 18 MVA con conexión Yn-d, cuyo neutro está conectado a tierra a través de la impedancia de conexión a tierra, cuyo valor es de  $3.3 \Omega$  y que en el modelo se introduce como una resistencia. Con esto se consigue fijar las tensiones fase-masa al valor de la tensión fase-neutro, incluso si se produce un defecto franco de aislamiento en alguna fase. La conexión a tierra del neutro permite reducir sustancialmente



los espesores de los aislamientos disminuyendo así los costes. Los parámetros de este transformador se muestran a continuación, Figura 5:

Parameters	
Units	pu
Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ]	[18e6 50]
Winding 1 (ABC) connection :	Yn
Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]	[ 25e3 4.7/(25e3 <sup>2</sup> /18e6)/30 4.7/(25e3 <sup>2</sup> /18e6) ]
Winding 2 (abc) connection :	Delta (D11)
Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]	[ 25e3 1e-6 0 ]
<input type="checkbox"/> Saturable core	
Magnetization resistance Rm (pu)	500
Magnetization reactance Lm (pu)	500

Figura 5 Parámetros transformador 18 MVA

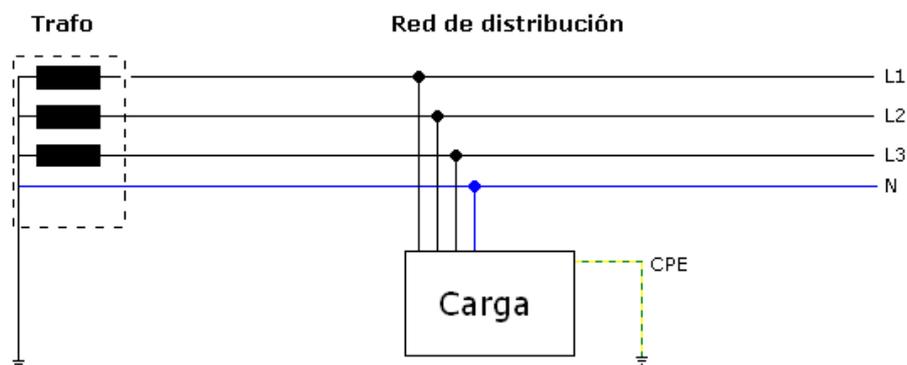


Figura 6 Esquema de una instalación con neutro del transformador y masas a tierra (TT)

- Un transformador trifásico de 2 MVA con conexión Yg-d, que pasa de 25 kV a 690 V. Los parámetros de este transformador se muestran a continuación, Figura 7:



Units	pu
Nominal power and frequency [ Pn(MVA) , fn(Hz) ]	[2e6 50]
Winding 1 (ABC) connection :	Yg
Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]	[25e3 , 0.025/30 , 0.025]
Winding 2 (abc) connection :	Delta (D1)
Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]	[ 690 , 0.025/30 , 0.025]
<input type="checkbox"/> Saturable core	
Magnetization resistance Rm (pu)	500
Magnetization reactance Lm (pu)	inf

**Figura 7 Parámetros transformador 2 MVA**

- Un equivalente  $\pi$  de una línea de 30 km de longitud cuyos parámetros se muestran a continuación, Figura 8:

Frequency used for R L C specification (Hz) :	50
Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [ R1 R0 ] :	[0.1153 0.413]
Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [ L1 L0 ] :	[1.05e-3 3.32e-3]
Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [ C1 C0 ] :	[11.33e-009 5.01e-009]
Line section length (km) :	30

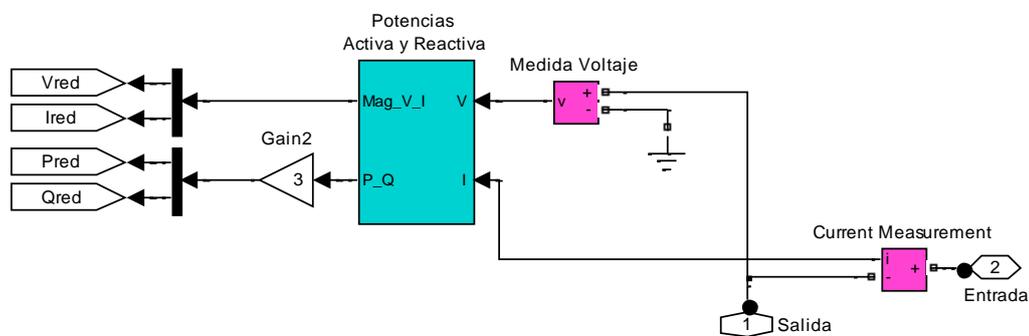
**Figura 8 Parámetros línea**

- Una carga trifásica de 82 kW con conexión en estrella, Y, conectada esta a tierra. Los parámetros de esta carga se muestran a continuación, Figura 9:

Parameters	
Configuration	Y (grounded)
Nominal phase-to-phase voltage $V_n$ (Vrms)	690
Nominal frequency $f_n$ (Hz):	50
Active power $P$ (W):	82e3
Inductive reactive power $Q_L$ (positive var):	0
Capacitive reactive power $Q_c$ (negative var):	0

**Figura 9** Parámetros carga

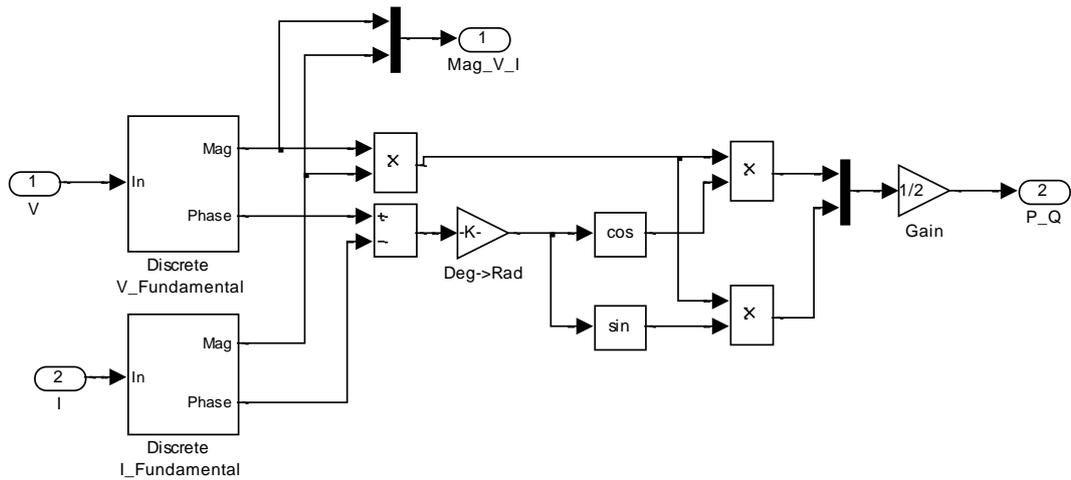
- Un bloque que se utiliza para medir la potencia activa y reactiva que se inyecta a la red desde el aerogenerador; este bloque es similar a otros que existen en este modelo y que por tanto se explicará solo en este apartado.

**Figura 10** Bloque de medida de potencias activa y reactiva

Se toman las medidas de una fase conectando a ésta un amperímetro y un voltímetro, éste último mide la tensión entre fase y tierra. Estos envían señales a un bloque (Potencias Activa y reactiva, Figura 11), configurado para trabajar a una frecuencia de 50 Hz, que calcula la magnitud de la tensión (tensión de línea) y la corriente así como las potencias activa y reactiva, teniendo en cuenta los desfases que existen entre tensión y corriente, esta última señal se multiplica por 3 para obtener las potencias trifásicas, suponiendo que el funcionamiento es equilibrado. Estas señales se desmultiplexan (ya que existen dos señales en cada hilo), y se envían por medio de sus correspondientes etiquetas, que se observan en la Figura 10, a los osciloscopios, donde se pueden ver los resultados de las simulaciones.

**Discrete Active & Reactive Power at fundamental frequency**

Pierre Giroux, Gilbert Sybille  
 Power System Simulation Laboratory  
 IREQ, Hydro-Quebec



**Figura 11 Sistema de medida de la potencia activa y de la reactiva**

- Un bloque que representa la entrada de la velocidad del viento y que se puede modificar libremente para simular a la velocidad deseada y que será una de las entradas al control del paso de pala.
- El bloque que representa el aerogenerador y sus controles propiamente dichos y que se explica en el apartado 2.1 de la memoria y en el apartado 5 del anexo.
- Un filtro capacitivo-resistivo con conexión en estrella con el neutro conectado a tierra formado por resistencias de 3 kW y condensadores de 150 kVAr. Los parámetros de este filtro se muestran a continuación, Figura 12:

Parameters	
Configuration	Y (grounded)
Nominal phase-to-phase voltage Vn (Vrms)	690
Nominal frequency fn (Hz)	50
Active power P (W)	150e3/50
Inductive reactive power QL (positive var)	0
Capacitive reactive power Qc (negative var)	150e3

**Figura 12 Parámetros filtro capacitivo resistivo**

- También se pueden ver en verde varios osciloscopios que permiten hacer un seguimiento de las señales que les envían los bloques de medida.



### 3. MODELADO DEL PAR

El bloque encargado de crear la señal de par con la que trabaja el generador es sin duda uno de los más importantes, consta de tres entradas que son la velocidad del viento medida en m/s, la velocidad de giro del rotor medida en valores por unidad y el ángulo de pala medido en grados, la explicación de cómo se controla el ángulo de pala se lleva a cabo en el siguiente punto del Anexo. La energía eólica es la energía cinética que el viento pierde a su paso por la aeroturbina, ésta pérdida se produce con el giro de las aspas que se traduce en la potencia mecánica,  $P_{mi}$ , que recibe el eje del generador.

Para los aerogeneradores se supondrá un perfil de pala común a partir del cual se deducirá el par en el eje de la turbina. Los valores que se observan en las ecuaciones siguientes responden al perfil aerodinámico de las palas.

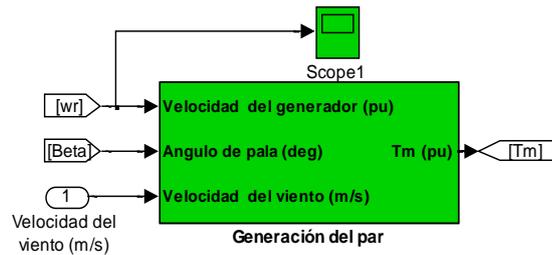


Figura 13 Bloque generador de Par

Para el modelado se realizan mediante bloques las siguientes ecuaciones teóricas, si bien en el modelo no se siguen al pie de la letra, al estar trabajando siempre en valores por unidad.

Así expresiones como  $\frac{R \cdot 2 \cdot \pi}{60}$  son sustituidas por constantes para trabajar en valores por unidad.

Potencia mecánica de la turbina del aerogenerador:

$$\text{Ec. 10} \quad P_{j,v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_{p_{j,v}}$$

Siendo R la longitud de la pala, es decir el radio de barrido de las aspas del aerogenerador,  $\rho$  la densidad del aire, v la velocidad del viento y  $C_p$  el coeficiente de potencia.

#### 3.1. Estimación de la densidad del aire

$$\text{Ec. 11} \quad \rho = \frac{p \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \left[ 1 - x_v \cdot \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$



$$\text{Ec. 12} \quad x_v = \frac{h}{100} \cdot (\alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot t^2) \cdot \frac{e^{\left(\frac{A \cdot T^2 + B \cdot T + C + \frac{D}{T}}{T}\right)}}{p}$$

$$\text{Ec. 13} \quad Z = 1 - \frac{p}{T \cdot \left[ a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + (b_0 + b_1 \cdot t) \cdot x_v + (c_0 + c_1 \cdot t) \cdot x_v^2 \right]} + \frac{p^2}{T^2 \cdot (d + E \cdot x_v^2)}$$

En las ecuaciones anteriores puede verse la dependencia de la densidad del aire de las condiciones de presión, temperatura y humedad relativa, queda claro al analizarlas que a mayor temperatura, mayor humedad relativa o menor presión se tiene una menor densidad del aire.

Considerando en las ecuaciones anteriores condiciones estándar, es decir, con una temperatura de 15°C, una presión de 101325 Pa y una humedad relativa del 0% además de los valores que pueden verse en la siguiente figura, se obtiene el valor de la densidad del aire.

$p$	presión atmosférica en Pa	$a_0 = 1,58123 \cdot 10^{-6}$	$\alpha = 1,0062$
$M_a$	masa molar del aire seco 0,0289635 kg/mol (para aire con una fracción molar de CO <sub>2</sub> $x_{CO_2}=0,0004$ )	$a_1 = -2,9331 \cdot 10^{-8}$	$\beta = 3,14 \cdot 10^{-8}$
$Z$	factor de compresibilidad adimensional	$a_2 = 1,1043 \cdot 10^{-10}$	$\gamma = 5,6 \cdot 10^{-7}$
$R$	constante molar de los gases 8,31451 J/(mol·K)	$b_0 = 5,7070 \cdot 10^{-6}$	A 1,24 · 10 <sup>-5</sup>
$T$	temperatura termodinámica en K, T = t + 273,15 (t °C)	$b_1 = -2,05 \cdot 10^{-8}$	B -1,91 · 10 <sup>-2</sup>
$x_v$	fracción molar de vapor de agua, adimensional	$c_0 = 1,9898 \cdot 10^{-4}$	C 33,93711047
$M_v$	masa molar del vapor de agua, 0,0180154 kg/mol	$c_1 = -2,3760 \cdot 10^{-6}$	D -6,34 · 10 <sup>-3</sup>
$t$	temperatura ambiente	$d = 1,83 \cdot 10^{-11}$	
$h$	humedad relativa en %	$E = 7,65 \cdot 10^{-9}$	

Figura 14 Parámetros utilizados en la estimación de la densidad del aire

La densidad del aire,  $\rho$ , tiene un valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup> y se tomará constante. Con lo que la ecuación Ec. 10 queda de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 14} \quad P_{j,v} = 0,5 \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_{p_{j,v}}$$

	R [m]
G-90	45
GEWE 1,5 SE	35.25

Tabla 1 Radio de las palas según el generador



La ecuación del par mecánico desarrollado por la turbina en el eje de alta velocidad, siendo  $rt$  la relación de transmisión de la multiplicadora, queda de la siguiente manera:

$$T_{j,v} = \frac{P_{j,v}}{\frac{w_r \cdot 2 \cdot \pi}{60} \cdot rt}$$

Ec. 15

### 3.2. Cálculo del coeficiente de potencia $C_p$

La fracción de energía capturada por un aerogenerador viene dada por el coeficiente de potencia. Este coeficiente de potencia tiene un valor máximo teórico de 59,3% denominado límite de Betz. Además depende del perfil aerodinámico de la pala.

Velocidad específica, responde a la relación entre la velocidad de la estela del viento en la punta de la pala y la velocidad del viento incidente:

$$landa_{j,v} = \frac{w_r \cdot R \cdot 2 \cdot \pi}{v}$$

Ec. 16

$$\lambda_{j,v} = \frac{1}{\frac{landa_{j,v} + 0.08 \cdot \beta}{\beta^3 + 1} - 0.035}$$

Ec. 17

La fracción de energía capturada por un aerogenerador viene dada por este coeficiente. El coeficiente de potencia tiene un valor máximo teórico de 59,3% denominado límite de Betz. Además depende del perfil aerodinámico de la pala:

$$Cp_{j,v} = 0.325 \cdot \left( \frac{116}{\lambda_{j,v}} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_{j,v}}} + 0.0068 \cdot landa_{j,v}$$

Ec. 18

En las siguientes figuras se puede ver la variación de la  $C_p$  para el generador en función de la velocidad del rotor, Figura 15, a velocidades del viento bajas, menores o iguales a la nominal de 12 m/s, se ha supuesto un  $\beta=0$ . A velocidades superiores a esta no se representarán ya que la variación del ángulo de paso de pala lo complica, sin embargo se muestra como varía la  $C_p$  al introducir un  $\beta \neq 0$  en la Figura 16 y en la Figura 17.

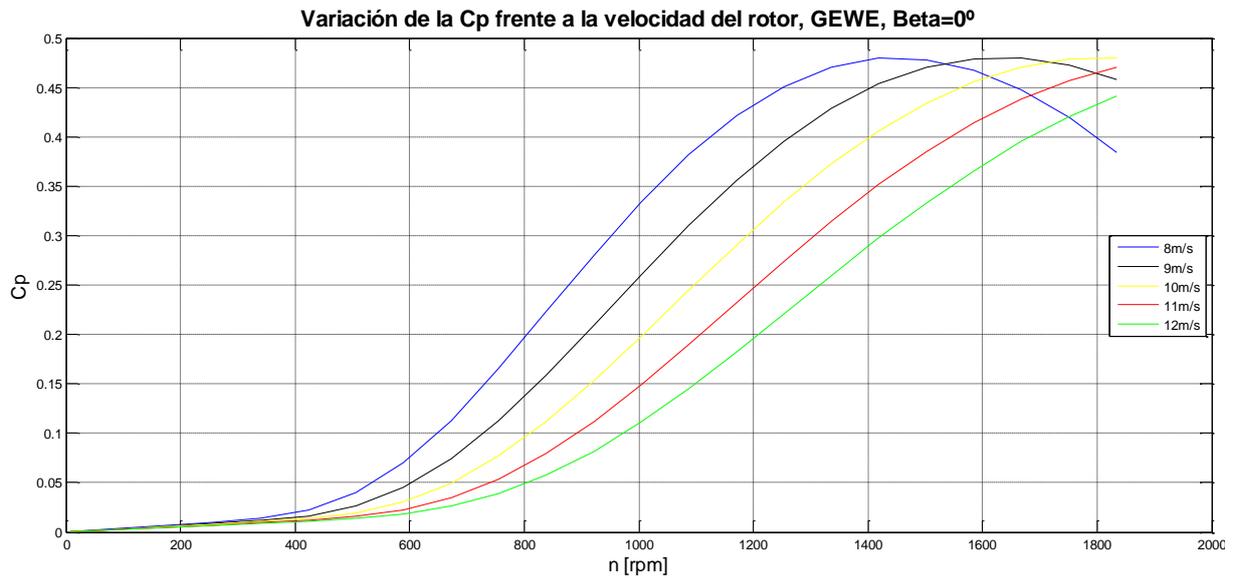


Figura 15 Variación de la  $C_p$  frente a la velocidad de giro del rotor (GEWE)

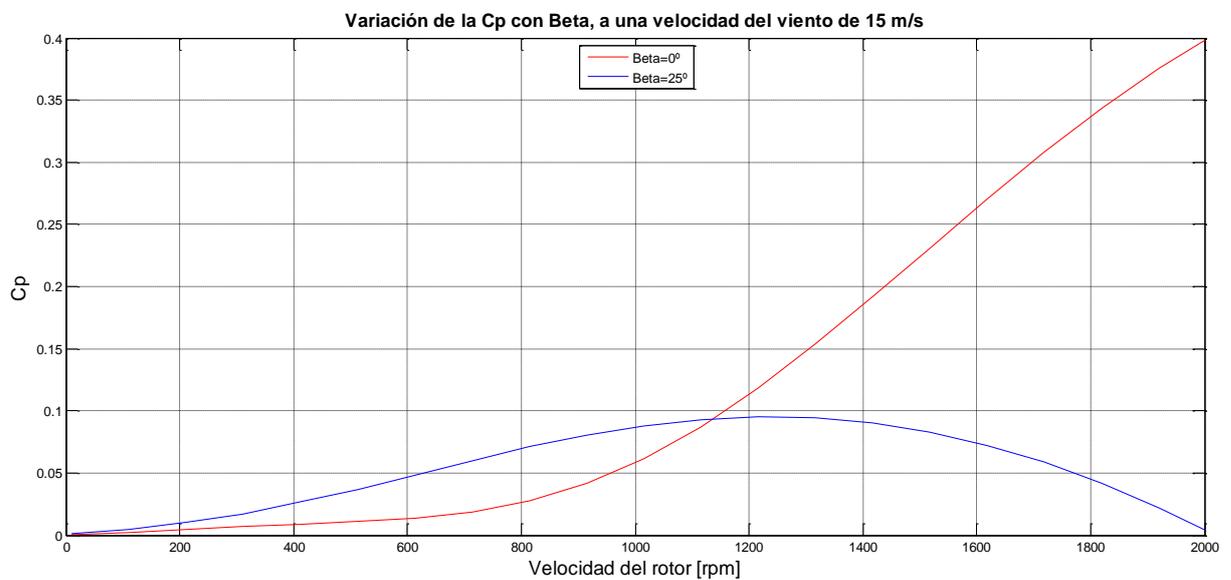


Figura 16 Variación de la  $C_p$  con la variación de  $\beta$

Se puede ver en la siguiente imagen un detalle de la figura anterior donde se aprecia mejor como la  $C_p$  disminuye bajando así la  $P_{mi}$ .

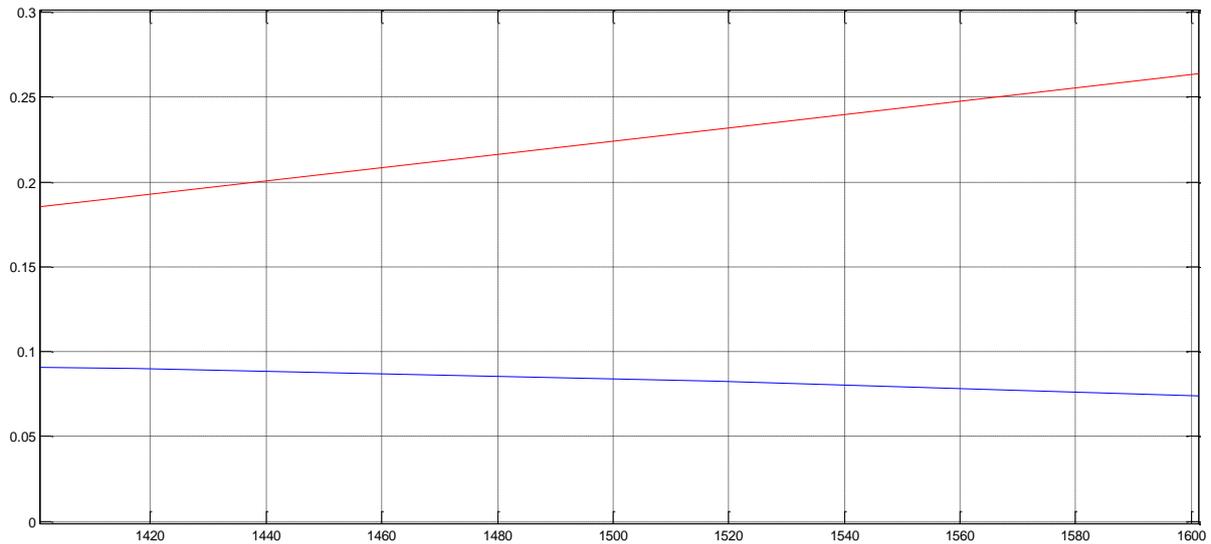


Figura 17 Variación de la  $C_p$  con la variación de Beta

En la siguiente figura se puede observar las características  $c_p$ - $\lambda$ , para diferentes valores del ángulo de pala,  $\beta$ .

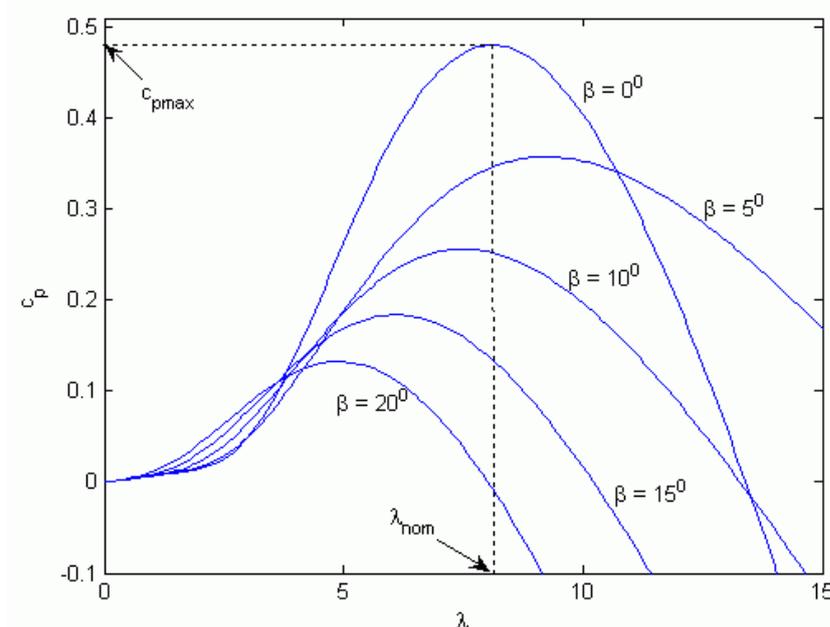


Figura 18 Variación ideal de la  $C_p$  con Beta

El máximo valor de la  $c_p$  ( $c_{pmax} = 0.48$ ) se consigue con  $\beta = 0^\circ$  y para  $\lambda = 8,1$ . Este valor particular se define como lambda nominal ( $\lambda_{nom}$ ).

### 3.3. Implementación en el modelo

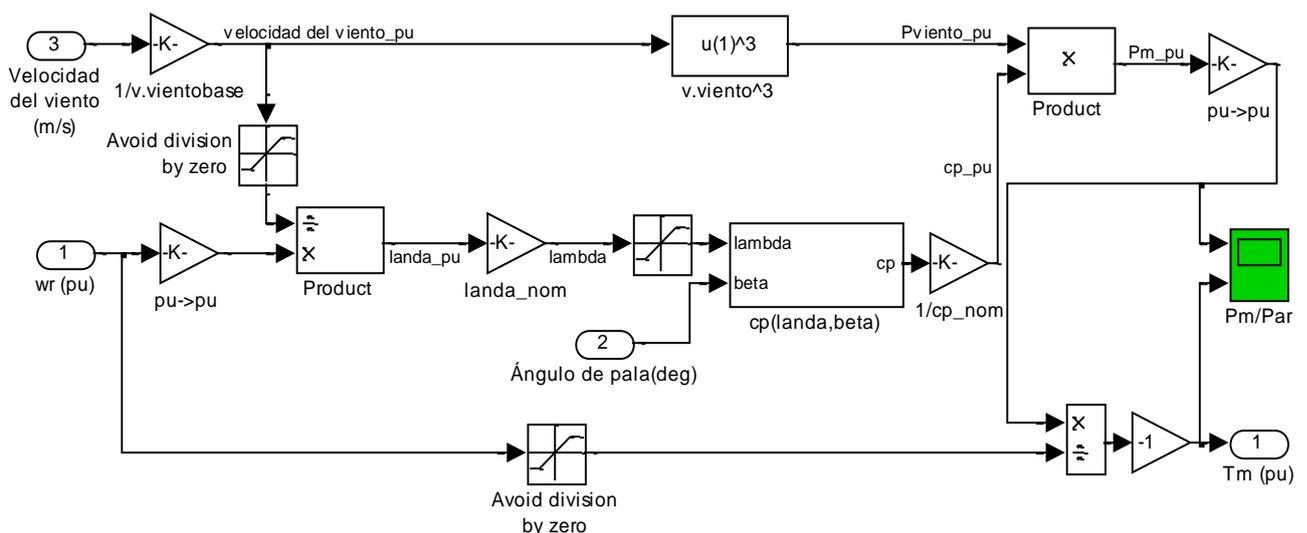
Se comentará a continuación la forma de llevar estas ecuaciones al modelo, esto se puede ver en la Figura 19. Comenzando por la entrada 3, velocidad del viento en m/s, se divide esta señal por la

velocidad del viento base para tenerla en valores por unidad, siguiendo hacia la derecha se eleva al cubo esta señal,  $v^3$ . La señal velocidad del generador en valores por unidad hay que dividirla por la velocidad de giro del generador para la máxima potencia a la velocidad del viento base, así se dividirá por 1,02 en el caso del aerogenerador directamente conectado a la red y por 1,2 en el generador doblemente alimentado.

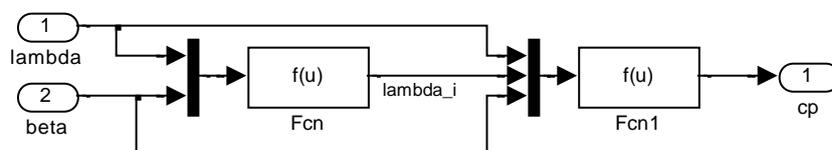
Esta señal se divide por la velocidad del viento en valores por unidad haciendo pasar previamente esta última por un bloque que impide que se produzca una división por 0. El resultado de esta señal es  $\lambda$  que se pasa a valores por unidad multiplicándola por el valor de la  $\lambda$  nominal, es decir, 8,1, en la Figura 20 se realizan las ecuaciones correspondientes a  $\lambda$ , en detalle en la Figura 21, y  $C_p$ , en detalle en la Figura 22, es decir, las ecuaciones Ec. 17 y Ec. 18. Esta última señal también se pasa a valores por unidad dividiéndola por el valor máximo de la  $c_p$  0,48.

El cálculo de la potencia mecánica interna  $P_{mi}$  se lleva a cabo multiplicando  $C_p$  y  $v^3$ , y posteriormente multiplicando por una constante de valor 0,657, que se obtiene de dividir la potencia nominal por la potencia eléctrica base. Por último para la obtención del par se divide la  $P_{mi}$  por la velocidad del generador en valores por unidad evitando nuevamente que se produzca la división por 0.

Al tratarse de un generador la señal del par que hay que pasarle al bloque que representa al generador ha de ser por supuesto negativa, es por ello que se multiplica por -1. Es importante llevar a cabo un seguimiento de los valores tanto de la potencia mecánica interna  $P_{mi}$  como del par  $T_m$ , por ello se incluye un osciloscopio.



**Figura 19** Implementación de la generación del par



**Figura 20** Implementación de  $\lambda$  y  $C_p$

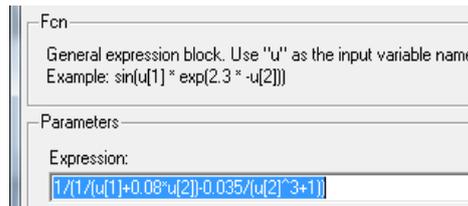


Figura 21

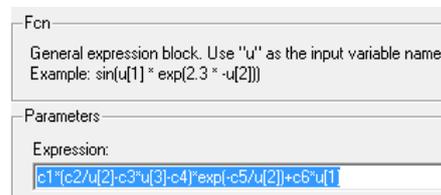


Figura 22

Los coeficientes c1 al c6 son:  $c1 = 0,325$ ,  $c2 = 116$ ,  $c3 = 0,4$ ,  $c4 = 5$ ,  $c5 = 21$  y  $c6 = 0,0068$  para cumplir con la ecuación Ec. 18. Con todo esto se pueden sacar las curvas características de la turbina, que para un  $\beta=0$  son:

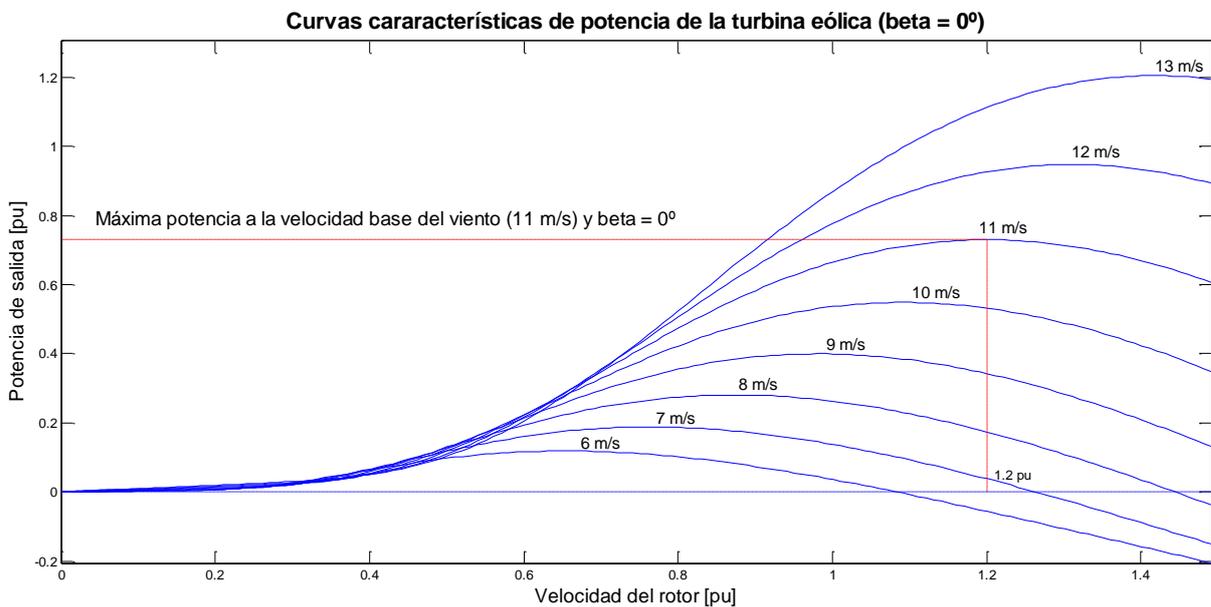


Figura 23 Curvas características de potencia de la turbina eólica

Para una velocidad del viento dada, existe una velocidad de rotación  $w_r$ , la cual genera máxima potencia:

Ec. 19  $P_{mi} = P_{opt}$

Es importante considerar que ante cambios en la velocidad del viento, la velocidad de rotación variará consecuentemente. Debido a que no se puede obtener una medida confiable en la variación



del viento, la ecuación para obtener la potencia máxima ( $P_{opt}$ ) conviene expresarla eliminando la dependencia con el viento, obteniéndose la ecuación:

$$\text{Ec. 20} \quad P_m = (\pi/2 \cdot C_{p_{opt}} \cdot \rho R^2 \cdot (R/\lambda_{opt})^3) \cdot w_t^3$$

De esta manera se puede observar que la potencia generada es una función de la velocidad de la turbina:

$$\text{Ec. 21} \quad P_m = k \cdot w_t^3$$

Las curvas características de la turbina, que para un  $\beta=0$  son las que pueden verse en la siguiente gráfica.

## 4. CONTROL DE PASO DE PALA

Se explicará a continuación el sistema de control de paso de pala, Figura 24, que se ha construido para el aerogenerador doblemente alimentado. Consiste en el siguiente bucle de control, Figura 26, en el que entran tanto la velocidad del rotor dada en valores por unidad filtrada mediante un filtro pasa-bajos de 1000 Hz, Figura 25, como la máxima velocidad del viento que admite este modelo 21 m/s, speed\_D, en valores por unidad. Después se restan estas señales, es decir, la proporcionalidad se establece con la diferencia entre la velocidad de giro del rotor y la velocidad máxima admisible del viento (velocidad de corte) esta última es una constante a medida que aumenta la velocidad del viento la velocidad del rotor también aumenta, es decir, la diferencia entre estas variables aumenta con lo cual beta también lo hará.

Posteriormente se multiplican por 500 que influirá en el peso que tendrá la regulación del paso de pala sobre el sistema. Seguidamente se tienen dos limitadores, el primero impide que el ángulo de pala sobrepase los 45° mientras que el segundo impide que la velocidad de variación del ángulo de pala supere los dos grados/s. La señal de salida de este bucle, en grados, acaba afectando a la potencia mecánica interna en el eje y por tanto al par producido, Figura 27.

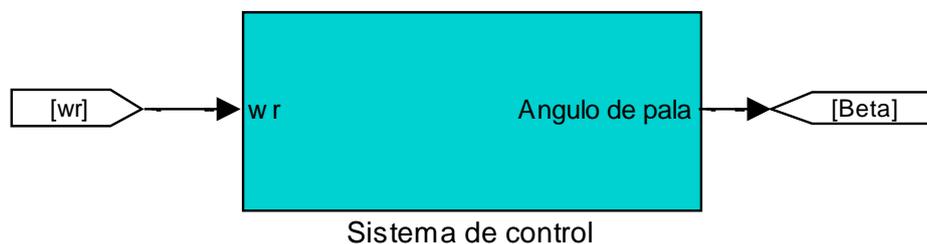


Figura 24 Bloque de control paso de pala

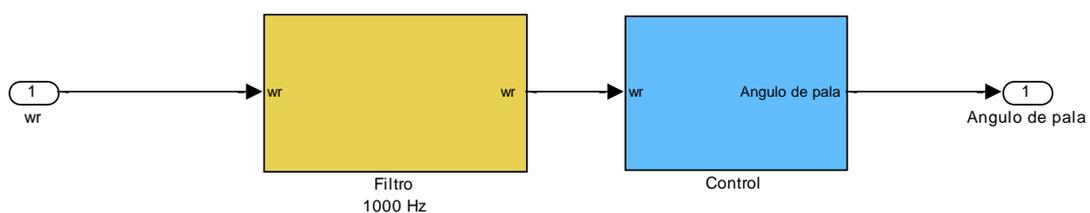


Figura 25 Filtrado de la señal de wr

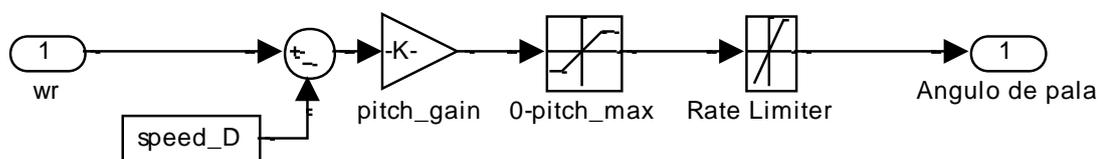


Figura 26 Implementación del control de paso de pala

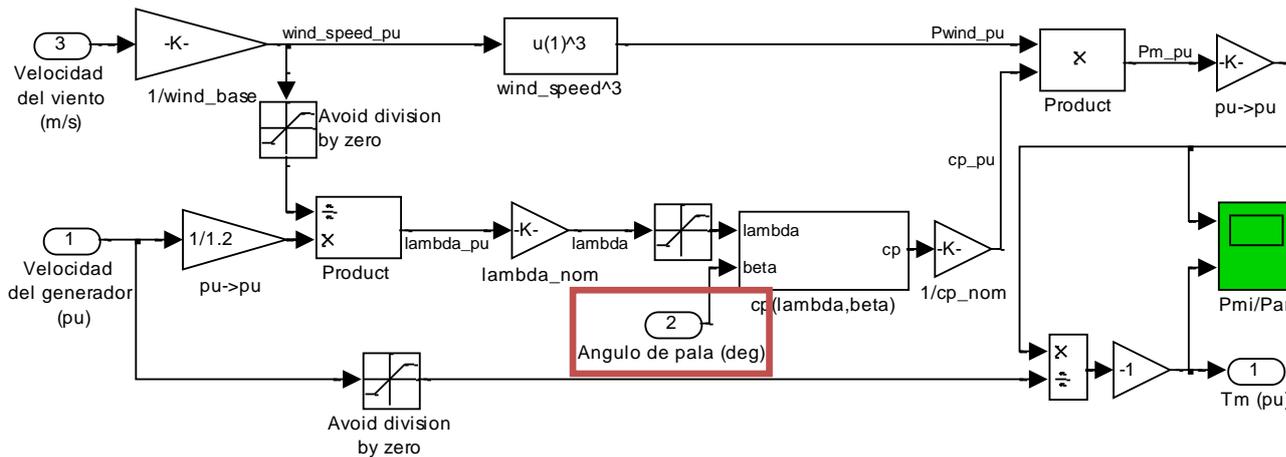


Figura 27 Detalle de la entrada del valor del ángulo de pala al generador de par

En la Figura 28 se puede ver como varía el ángulo de pala para distintas velocidades del viento, con una velocidad inferior a 13 m/s el ángulo de pala permanece constante e igual a 0°. Se puede ver como para que la aceleración del generador sea máxima en el arranque, en un tiempo de 1,7 s aproximadamente, el ángulo de pala también es igual a 0°; esto se debe a que el generador, de grandes dimensiones al ser de 1,5 MW, tiene una constante de inercia grande 4.65 s. Después comienza a actuar la regulación del paso de pala lo cual se puede ver mejor en la Figura 29, también se observa como en el momento en que comienza dicha regulación la potencia mecánica interna,  $P_{mi}$ , varía como ya se explico en el apartado anterior, Figura 30. Los picos que se observan se deben a que la regulación se pasa y oscila hasta que se estabiliza.

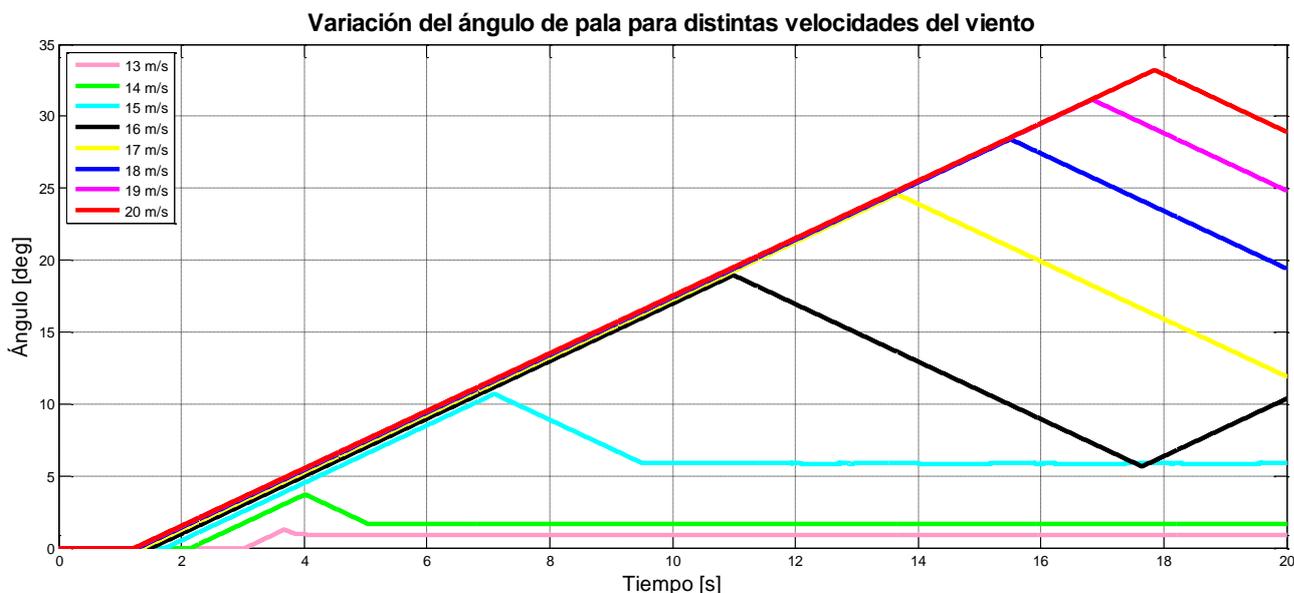


Figura 28 Variación del ángulo de pala según velocidad del viento

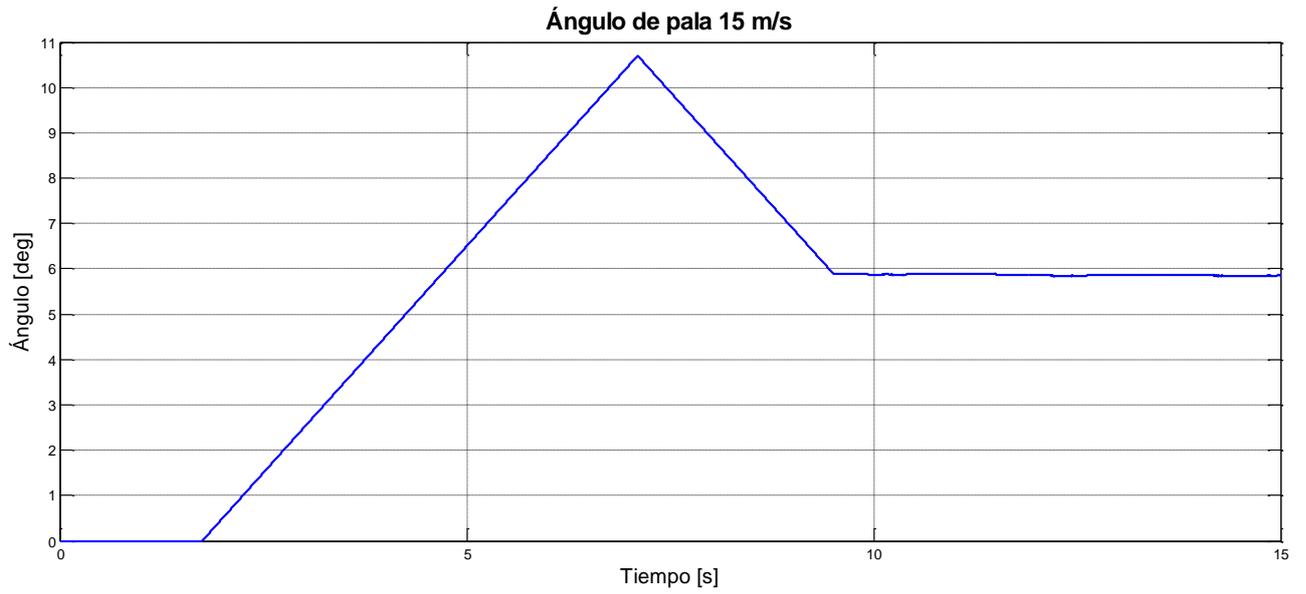


Figura 29 Variación y estabilización del ángulo de pala 15 m/s

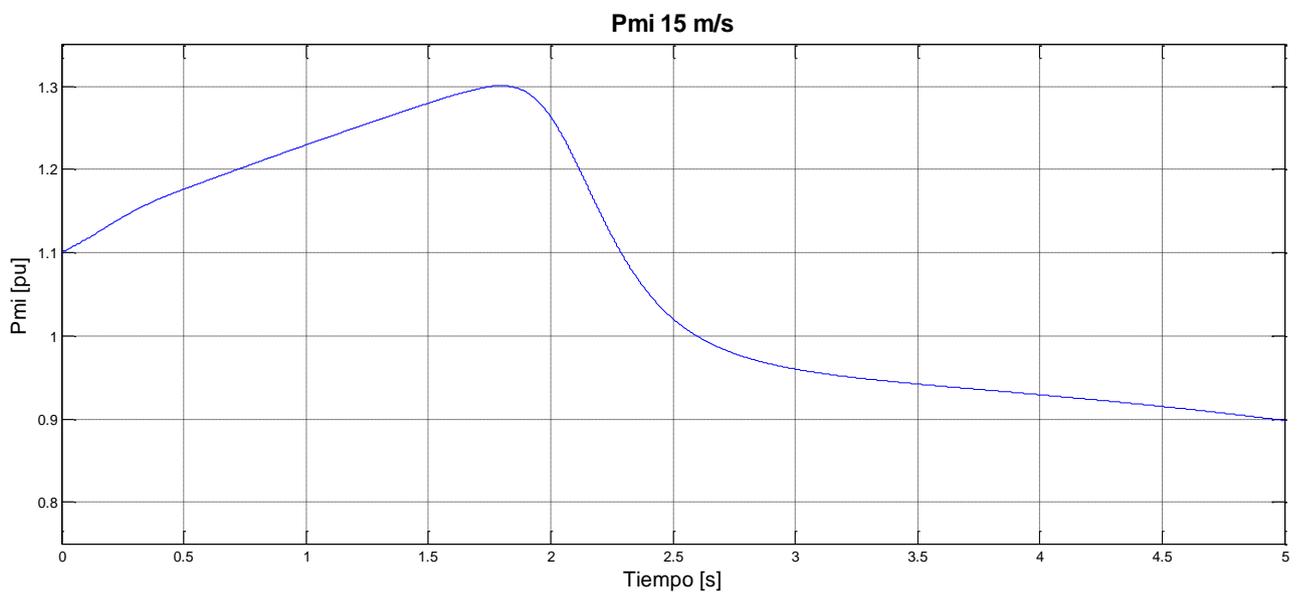


Figura 30 Efecto del ángulo de pala sobre la  $P_{mi}$



## 5. CONTROL DE LOS CONVERTIDORES

Realizar un buen control del puente de convertidores es vital para el funcionamiento del generador doblemente alimentado, el control del convertidor del lado de la red y el del lado del rotor que se realizan de forma independiente, se lleva a cabo mediante la adecuada selección de los pulsos encargados del disparo de los transistores IGBT's de los convertidores. Los datos de entrada que se requieren para llevar a cabo el control, que se pueden ver en la Figura 31 son los siguientes:

- La tensión de la red ( $V_{abc\_B1}$ )
- Referencia de reactiva ( $Q_{ref}$ ), permite fijarle el flujo de reactiva a los convertidores, el control regulará para que este consumo se aproxime a la referencia
- $I_q$  de referencia para el convertidor del lado de red ( $I_{q\_red\_conv\_ref}$ ), su función viene a ser la misma que la anterior ya que la reactiva se controla mediante la  $I_q$
- La velocidad del rotor ( $w_r$ )
- La corriente que circula por el convertidor del lado de red ( $I_{abc\_red\_conv}$ )
- La corriente que circula por el rotor ( $I_{abc\_rotor}$ )
- Reactiva de la red ( $Q_{B1}$ )
- Tensión del bus de continua ( $V_{dc}$ )
- Posición o ángulo del rotor ( $angle\_rotor$ )

Como ya se ha comentado las salidas son los pulsos de disparo de los transistores que constituyen los convertidores, también se ve la salida del control del ángulo de pala que se ha incluido dentro del sistema de control ya que ayuda a regular el par de entrada al generador y a pesar de que no tiene relación directa con los convertidores sí que comparte algunos de los datos de entrada. El sistema de control del ángulo de pala se ha comentado ya en el apartado 4 CONTROL DE PASO DE PALA.

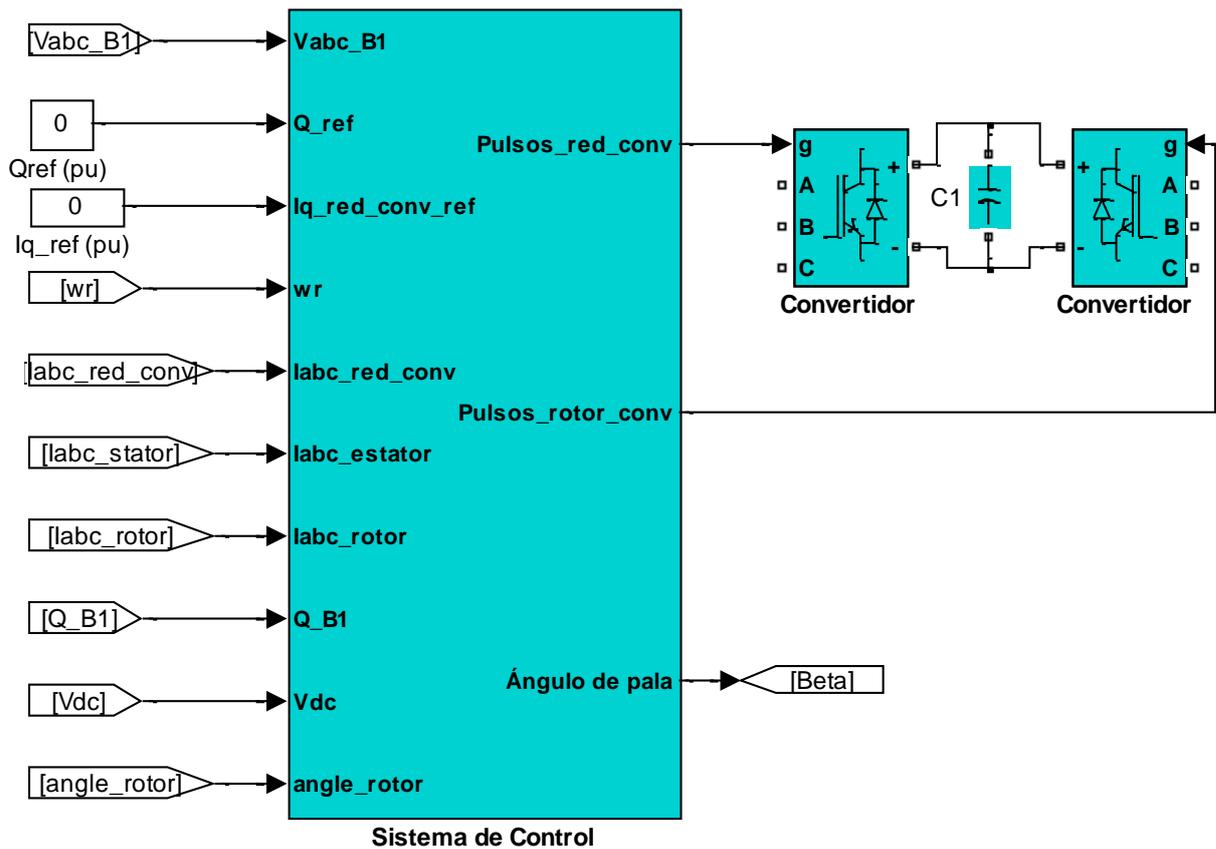


Figura 31 Sistema de control del generador doblemente alimentado

Antes de realizar el control es necesario llevar a cabo un filtrado de las señales para evitar que los posibles armónicos de las señales tengan un efecto negativo sobre el sistema de control, por ello se crea un subsistema donde se encuentran los distintos filtros para cada señal individual.

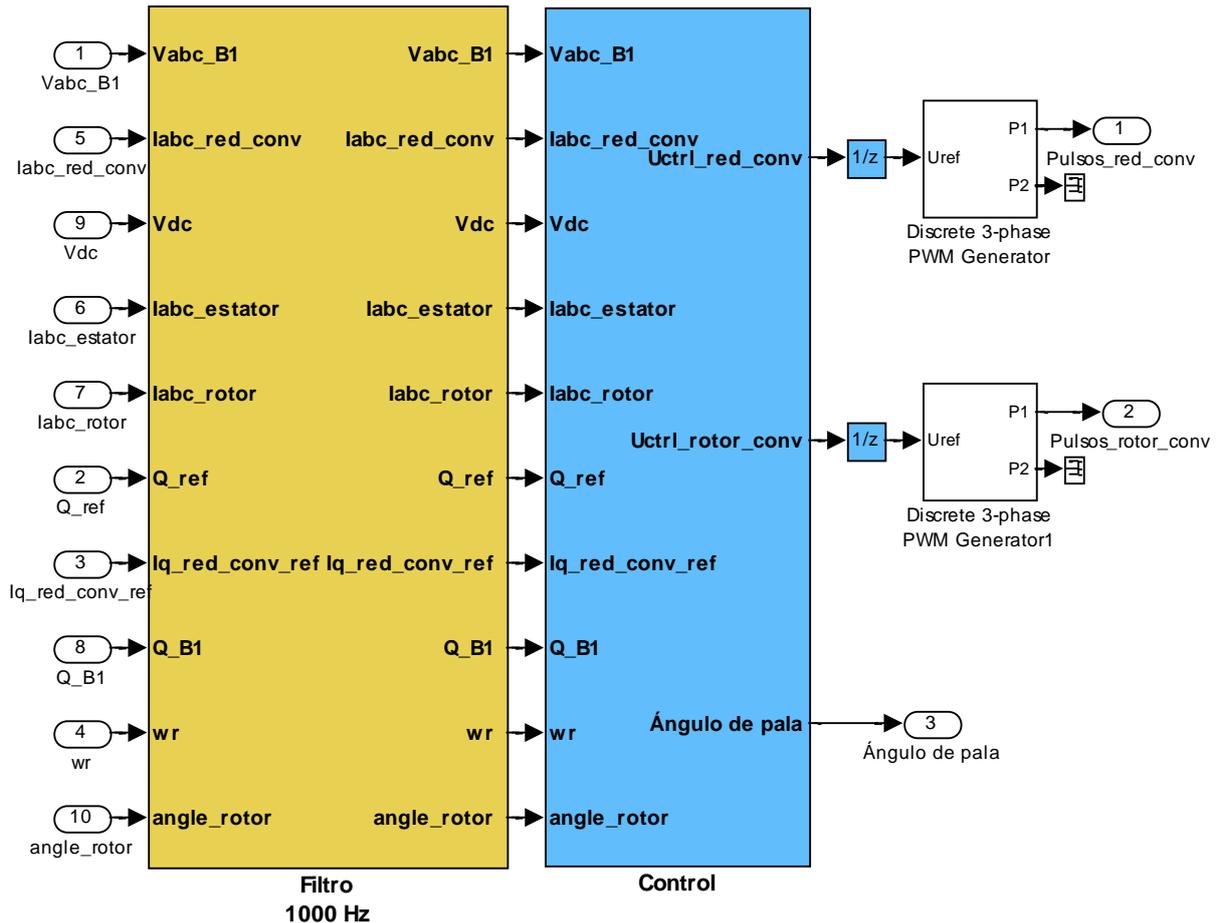


Figura 32 Filtrado de las señales de entrada al control

Se puede ver en la Figura 32 que cada señal es filtrada previamente, y en la Figura 33 se pueden ver los filtros propiamente dichos. Se trata de filtros pasa-bajos de frecuencia de corte de 1000 Hz, con el fin de eliminar las componentes de alta frecuencia propias de la modulación PWM. Es necesario descomponer aquellas señales que poseen tres componentes, esto se lleva a cabo mediante la utilización de desmultiplexadores, una vez se ha filtrado cada componente se multiplexan para obtener la señal inicial de tres componentes filtrada.

En la Figura 32 también se puede ver que lo que se obtiene del bloque Control son las formas de onda de las moduladoras con las que se controlan los convertidores, de estas ondas se obtienen, después de hacerlas pasar por el bloque  $1/z$  que es un retardo de un paso de muestreo discreto  $1/z$ , las respectivas señales PWM que conectan con las puertas de los convertidores mediante los bloques que se observan.

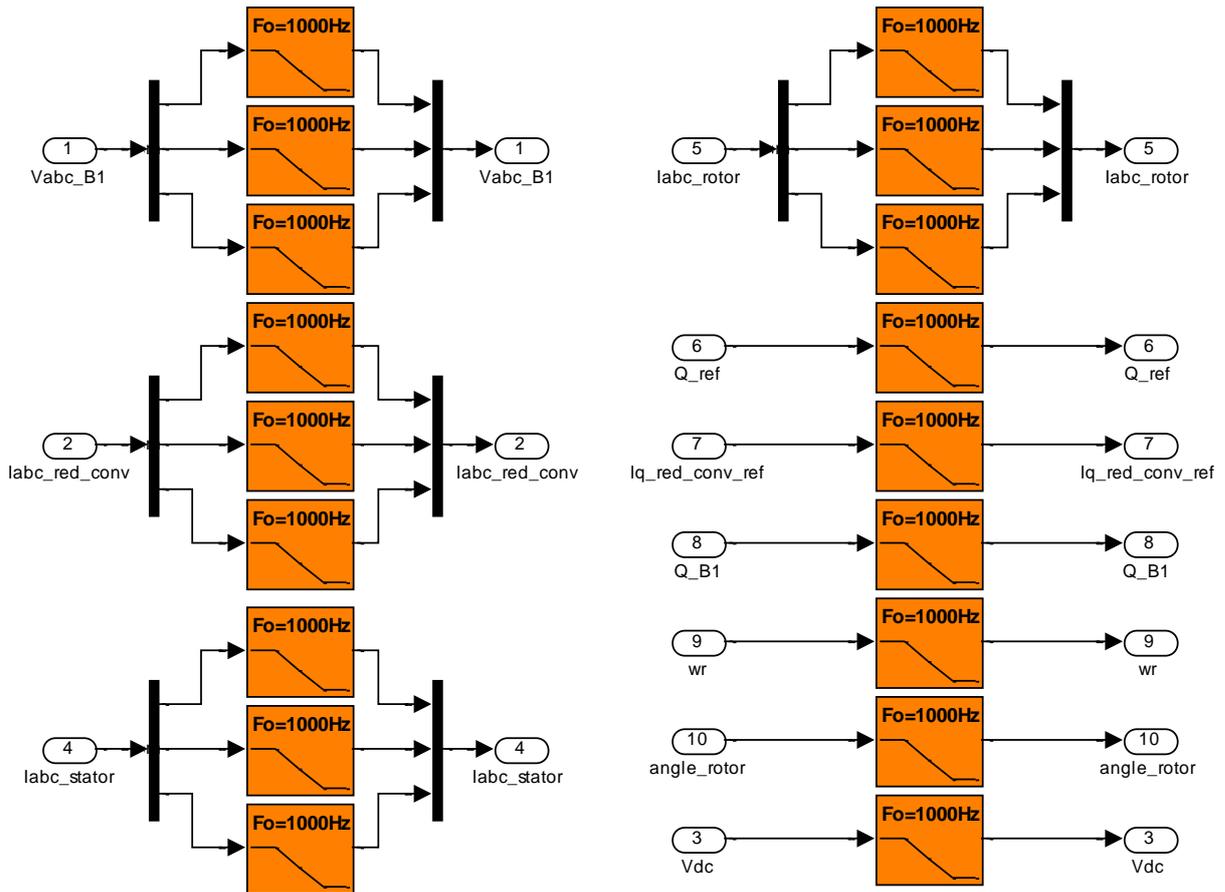


Figura 33 Filtros de las señales

Se explicará a partir de este punto el control de los convertidores propiamente dicho, este, como ya se ha dicho, se realiza de manera independiente para el convertidor del lado de la red y el del lado del rotor. Ambos sistemas comparten varios de los datos iniciales de entrada como se puede ver en la Figura 34, pero para llevar a cabo el control se precisan dos datos de entrada más que se han de obtener a partir de la tensión de la red, son la frecuencia de la red y la posición del campo magnético en función del tiempo ( $\theta = \omega \cdot t$ ). En la Figura 34 se puede observar el bloque que se encargaría de obtener estas variables en la parte superior izquierda de la figura.

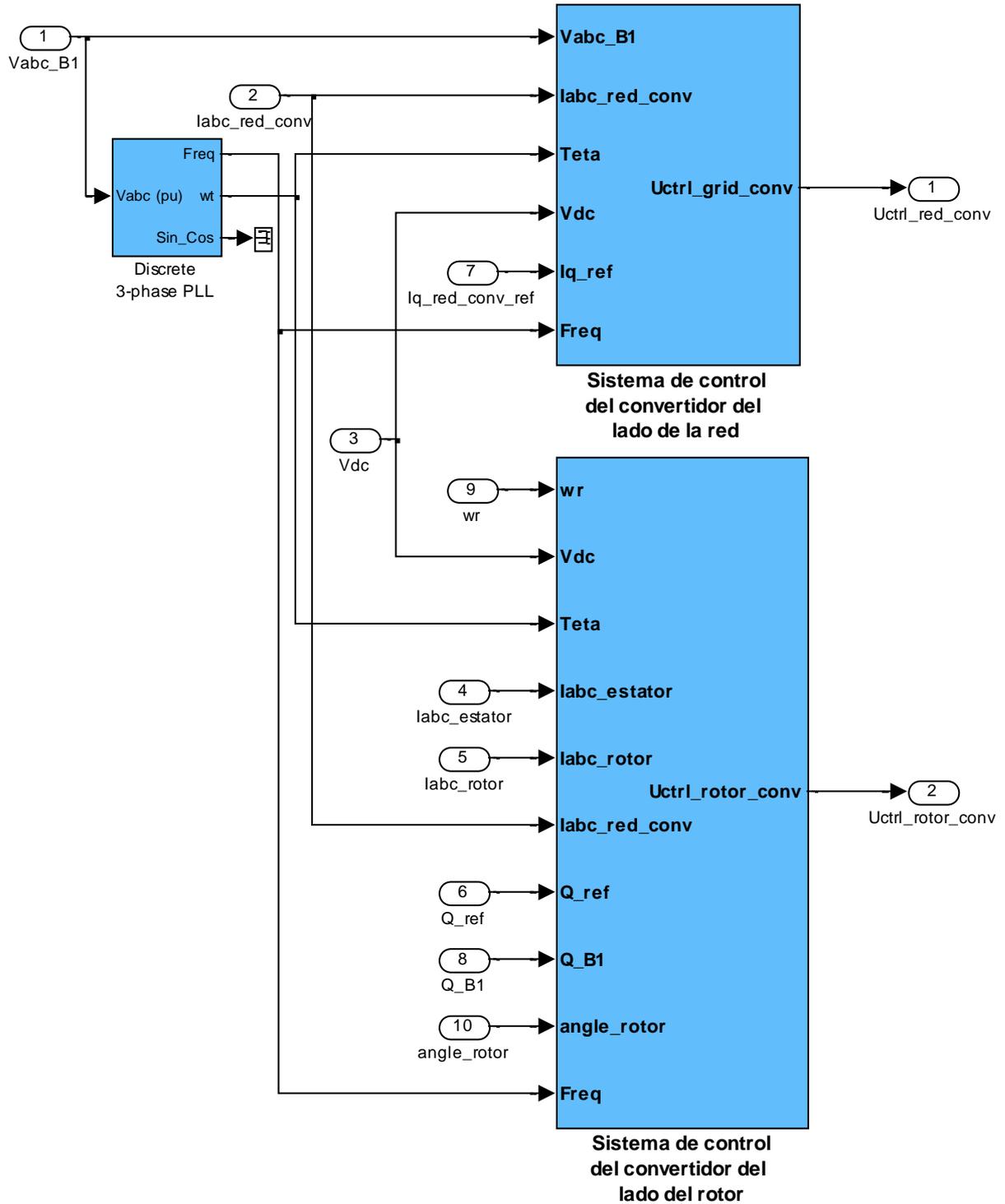


Figura 34 Entrada de datos a los sistemas de control del lado de la red y del rotor

### 5.1. Sistema de control del convertidor del lado de la red

Empezando por el sistema de control del convertidor del lado de la red, Figura 35, se comentará cada uno de los bloques que forman este control, además se visualizará mediante una simulación en

bucle abierto la forma de actuar del control. El seguimiento de las variables en bucle cerrado resulta difícil de realizar debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso.

Los datos de entrada para este control son:

- La tensión de la red ( $V_{abc\_B1}$ )
- $I_q$  de referencia para el convertidor del lado de red ( $I_{q\_red\_conv\_ref}$ )
- $Teta = w \cdot t$
- La corriente que circula por el convertidor del lado de red ( $I_{abc\_red\_conv}$ )
- Frecuencia red
- Tensión del bus de continua ( $V_{dc}$ )
- Tensión del bus de continua nominal ( $V_{dc\_nom} = 1200 \text{ V}$ )

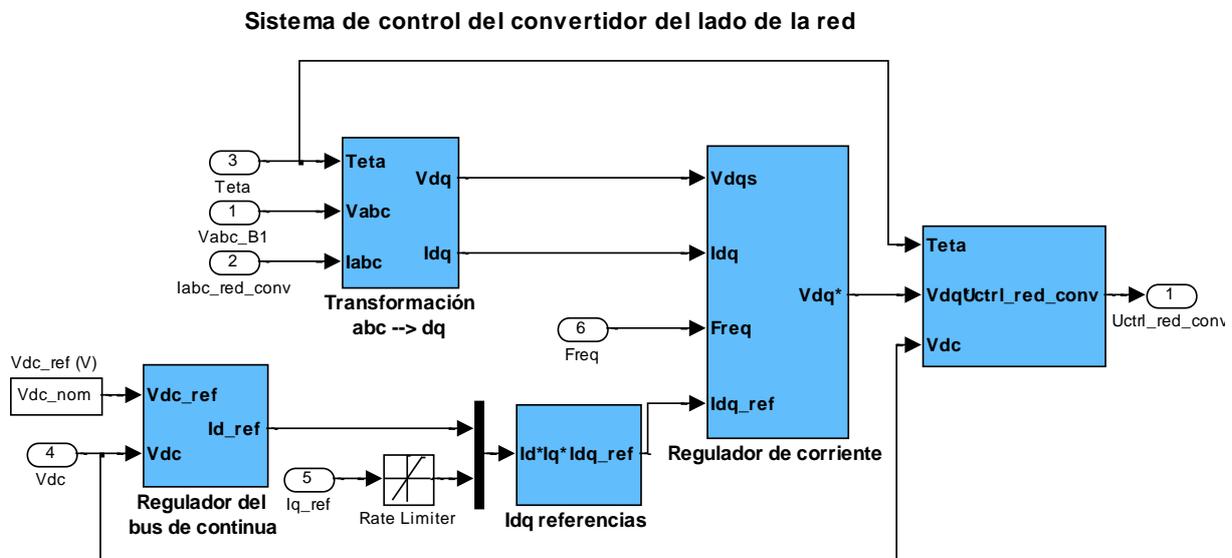


Figura 35 Sistema de control del lado de la red

Para analizar una máquina eléctrica en régimen transitorio hay que plantear un sistema de ecuaciones. El primer conjunto de ecuaciones relaciona la tensión en bornes de cada devanado con la intensidad del propio devanado y con la de los demás, a través de las inductancias propias y mutuas:

$$\text{Ec. 22} \quad [u] = [R][i] + \sum \frac{d}{dt} \cdot ([L][i])$$

Donde  $[u]$  e  $[i]$  son los vectores columna de la tensión y de la intensidad en cada uno de los devanados y  $[L]$  es la matriz de impedancias propias y mutuas entre devanados.

La siguiente ecuación proporciona el par desarrollado por la máquina eléctrica. Para obtener esta ecuación, se hace uso de que todos los sistemas tienden a la mínima energía almacenada, de forma que cuando una máquina gira, la energía mecánica desarrollada es numéricamente igual a la

reducción de la energía magnética almacenada; de esta forma, el par se obtiene como la derivada de la energía magnética almacenada respecto del ángulo girado. Para una máquina de  $p$  pares de polos se tiene:

$$\text{Ec. 23} \quad T = p \cdot \frac{1}{2} \cdot [i]_r \cdot \frac{d[L]}{d\varepsilon} \cdot [i]$$

Donde  $\varepsilon$  (Teta en el modelo) es el ángulo de la referencia rotativa y siendo  $\omega$  la velocidad angular de la referencia d-q (igual a la pulsación del sistema trifásico del lado de alterna del convertidor) y  $\varepsilon_0$  el ángulo inicial de la referencia d-q.

$$\text{Ec. 24} \quad \varepsilon = \int_0^t \omega \cdot dt + \varepsilon_0$$

La dificultad de trabajar con las ecuaciones anteriores, proviene de que son ecuaciones no lineales, dado que la inductancia mutua entre los devanados alojados en el estator y los alojados en el rotor  $[L]$ , depende de la posición del rotor y por ello del tiempo.

Para solucionar este problema y llegar a unas ecuaciones lineales, se aplicará una transformación matemática, la transformación de Park, a todos los devanados trifásicos.

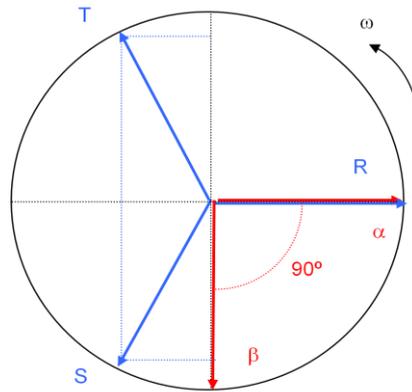


Figura 36 Transformación a ejes d y q

La transformación de Park se expresa como:

$$\text{Ec. 25} \quad \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix} = [P(\varepsilon)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

Donde:



$$\text{Ec. 26} \quad [P(\varepsilon)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}(\varepsilon) & -\text{sen}\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

La transformación inversa es:

$$\text{Ec. 27} \quad \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = [P(\varepsilon)] \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\text{Ec. 28} \quad [P(\varepsilon)] = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & -\text{sen}(\varepsilon) & 1 \\ \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

En definitiva, la transformación de Park sustituye un devanado trifásico por dos devanados situados en ejes ortogonales entre sí (el eje directo d y el eje transversal o en cuadratura q) que giran a una velocidad  $d\varepsilon/dt$  y que crean una onda de campo magnético idéntica a la del devanado trifásico, más un tercer devanado homopolar. Las ventajas de la transformación de Park son las siguientes:

- Despreciando el efecto de la saturación, las inductancias propias y mutuas que aparecen entre los nuevos devanados son constantes, incluso en máquinas en las que el rotor tenga polos salientes, ya que los enlaces de flujo que concatenan un devanado cualquiera alojado en el eje d son creados solamente por los devanados alojados en ese eje. Lo mismo pasa en el eje q.
- La componente homopolar frecuentemente es nula, salvo en máquinas conectadas en estrella con el neutro conectado a tierra o a la red.
- Las tensiones y corrientes de eje directo y transversal son constantes en los regímenes permanentes, y varían lentamente en los regímenes transitorios. En efecto, en régimen permanente sinusoidal un devanado trifásico crea una onda de campo magnético giratorio de velocidad y amplitud constantes, para crear esa misma onda de campo a partir de dos devanados que giran, la intensidad que debe circular es constante.

Por tanto en la simulación lo primero es pasar las componentes trifásicas de tensión y corriente a componentes dq0. Esto se hace mediante el bloque Transformación abc → dq0 que se puede ver con detalle en la Figura 37. Se recuerda que la señal  $Teta = \omega \cdot t$  (de la tensión de la red), una vez

calculados el seno y el coseno de esta señal se pueden obtener  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $I_d$  e  $I_q$ . Siendo  $V_d$  e  $I_d$  las variables relacionadas con la potencia activa y  $V_q$  e  $I_q$  las relacionadas con la potencia reactiva.

### Transformación abc-->dq0

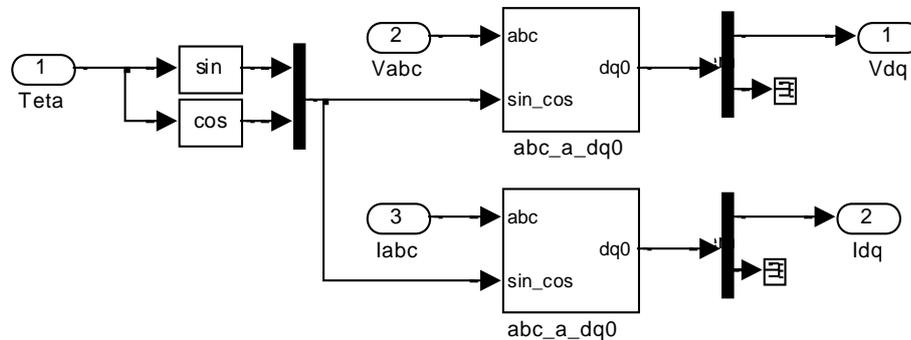


Figura 37 Transformación a ejes d y q

Para llevar a cabo el control se necesitan unas  $I_d$  e  $I_q$  de referencia, en las siguientes líneas se explicará cómo se obtienen. La  $I_{q\_ref}$  es uno de los datos iniciales de control que se introducían en el subsistema que parece representado en la Figura 35, simplemente se conecta a un limitador (Rate Limiter) de tasa de crecimiento (200) y decrecimiento (-200). Este tipo de limitador, que se verá también en bloques posteriores, impide que la variable a la que afecta experimente una variación por unidad de tiempo elevada; evitando, de este modo, transitorios abruptos.

Para obtener la  $I_{d\_ref}$  hay que realizar una comparación entre el valor nominal de la tensión del bus de continua y la tensión que se tiene realmente en cada instante de tiempo, la diferencia entre ambas variables,  $V_{dc}$  y  $V_{dc\_ref}$ , se encuentra en relación con el flujo de potencia activa al que se ve expuesto el convertidor. De ahí la relación entre esta diferencia y la componente directa de la corriente. El regulador del bus de continua, Figura 38, lleva a cabo esta operación restando estos valores y haciéndolos pasar por un regulador PI ( $K_p=0.002$ ,  $K_i=0.05$ ) y un limitador similar al del caso anterior.

### Regulador del bus de continua

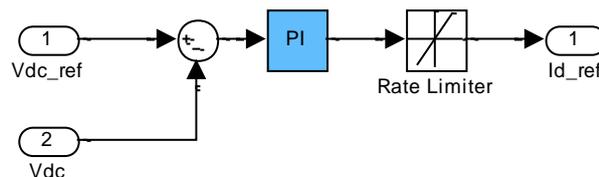


Figura 38 Regulador del bus de continua

En la Figura 39 se ve cómo actúa el regulador del bus de continua aunque debido a la escala no se aprecia bien el valor de la  $I_{d\_ref}$ , por ello en la Figura 40 se hace un detalle de esta corriente.

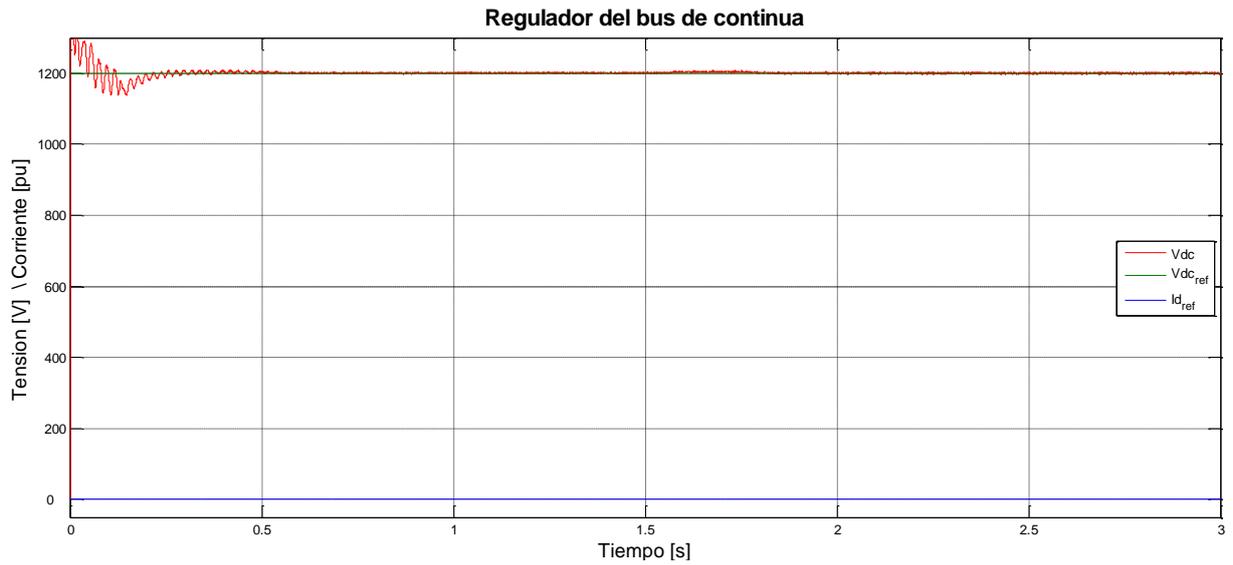


Figura 39 Regulador bus de continua V.viento= 15 m/s

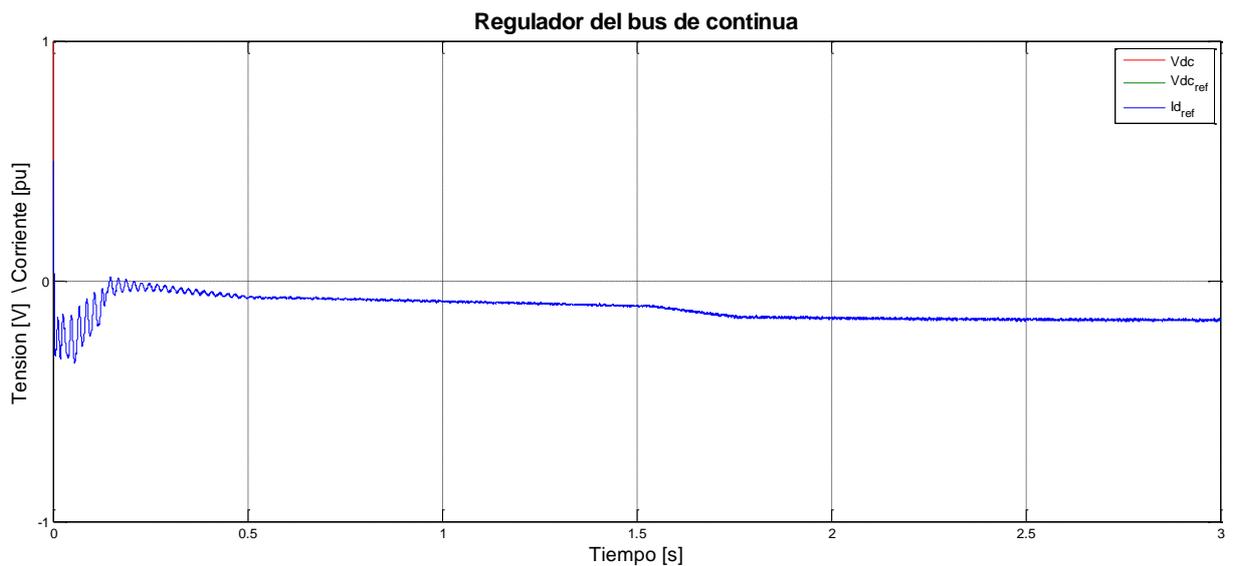
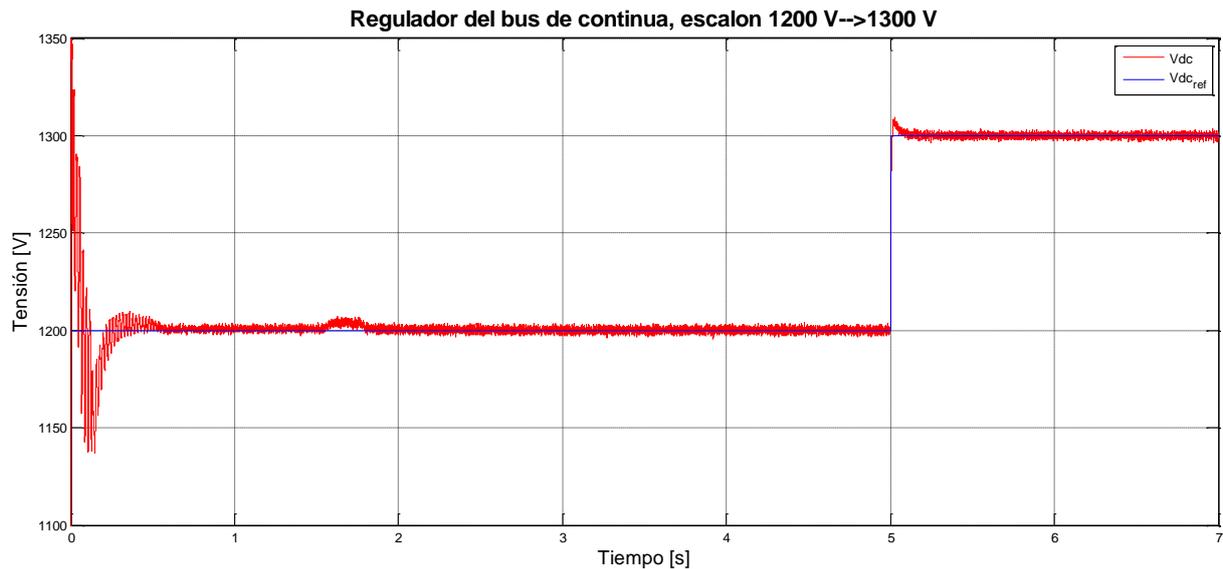
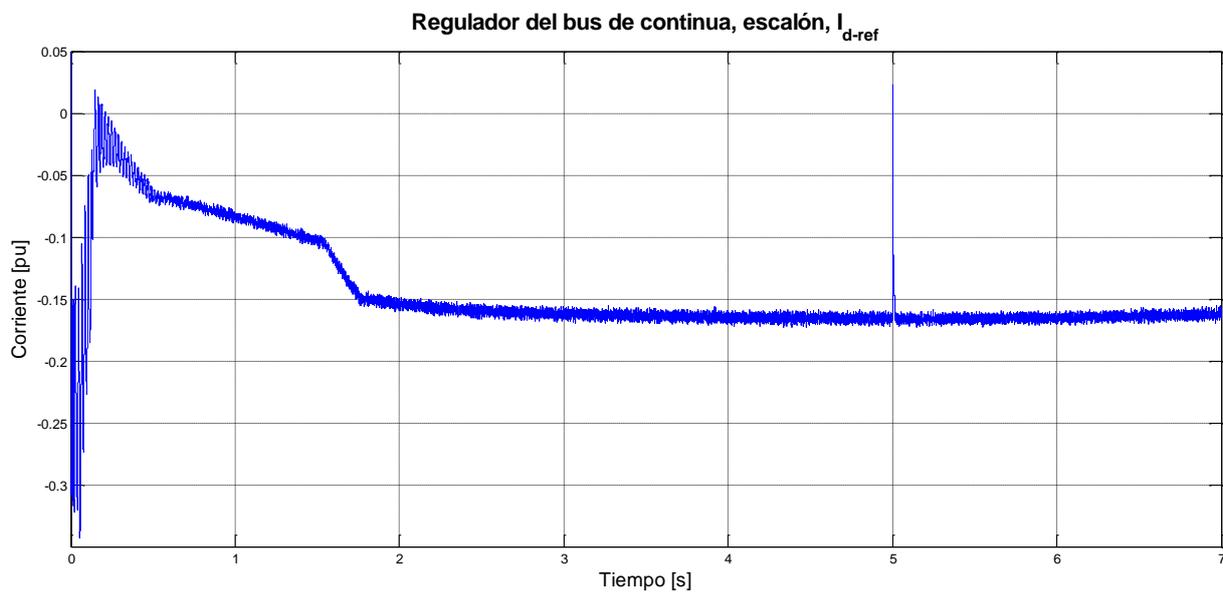


Figura 40 Detalle de la  $I_{d\_ref}$

A continuación se representa en otra figura un escalón en la tensión de continua de referencia, para poder observar así la evolución de la  $I_{d\_ref}$ . Se lleva a cabo un escalón de 100 V pasando de 1200 V a 1300 V en el segundo 5 de la simulación con una velocidad del viento igual a 15 m/s.



**Figura 41** Regulador del bus de continua, escalón en 5s de V<sub>dc\_ref</sub> pasa de 1200 V a 1300 V



**Figura 42** Regulador del bus de continua, escalón en 5s de V<sub>dc\_ref</sub> pasa de 1200 V a 1300 V, representación de la I<sub>d-ref</sub>

Finalmente para obtener estos valores de I<sub>d</sub>\* I<sub>q</sub>\* se hacen pasar por un limitador que vigila la I<sub>q</sub> que consume el convertidor, el conmutador, de tres entradas y dos posiciones para la salida, funciona de la siguiente forma, la salida se conecta a la entrada 1 cuando la entrada 2 es mayor que la I<sub>máx</sub> del convertidor y se conecta a la entrada 3 en caso contrario. Es decir, cuando la  $\sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}$  es menor que la I<sub>red</sub> máxima que tolera el convertidor el conmutador deja pasar la I<sub>d</sub> y



Se puede efectuar ahora el autentico control, esto se hace mediante el regulador de corriente, Figura 45. Este sistema de control va a ejercer la regulación sobre las corrientes actuando sobre las tensiones de alterna que dispone el convertidor en su conexión a la red. Corrientes y tensiones se encuentran relacionadas de acuerdo a las ecuaciones Ec. 29 y Ec. 30. La idea es obtener las tensiones moduladoras con las que extraer las señales PWM de disparo y atacar a cada uno de los transistores que constituyen el puente. Estas señales moduladoras resultan proporcionales a las tensiones de alterna del convertidor y éstas indirectamente controlan el flujo de corriente.

Partiendo de la frecuencia que se mide en la red y de la frecuencia nominal  $f_n = 50$  Hz se obtiene la  $w_s$  en valores por unidad. Con las variables medidas de tensión  $V_{dq}$  y las referencias de corriente en ejes d y q, obtenidas en el anterior subsistema, se verifican las ecuaciones Ec. 29 y Ec. 30. Donde  $R_{RL} = 0,003$  pu y  $L_{RL} = 0,3$  pu, que son los valores de la resistencia y la inductancia de choque. La diferencia entre ambas partes de las igualdades proporciona un error, se pueden ver en la Figura 45 recuadradas en rojo. Ese error se compara con a su vez con las tensiones  $V_{d'}$  y  $V_{q'}$  y el resultado determina las tensiones de referencia.

Las tensiones  $V_{d'}$  y  $V_{q'}$  se obtienen como salidas del regulador PI de corriente ( $K_p = 2,5$  y  $K_i = 500$ ). Este regulador se alimenta del error obtenido al restar a las corrientes de referencia en ejes d y q, las corrientes medidas.

$$\text{Ec. 29} \quad V_d = R_{RL} \cdot I_{dr} - L_{RL} \cdot w_s \cdot I_{qr}$$

$$\text{Ec. 30} \quad V_q = R_{RL} \cdot I_{qr} + L_{RL} \cdot w_s \cdot I_{dr}$$

### Regulador de corriente

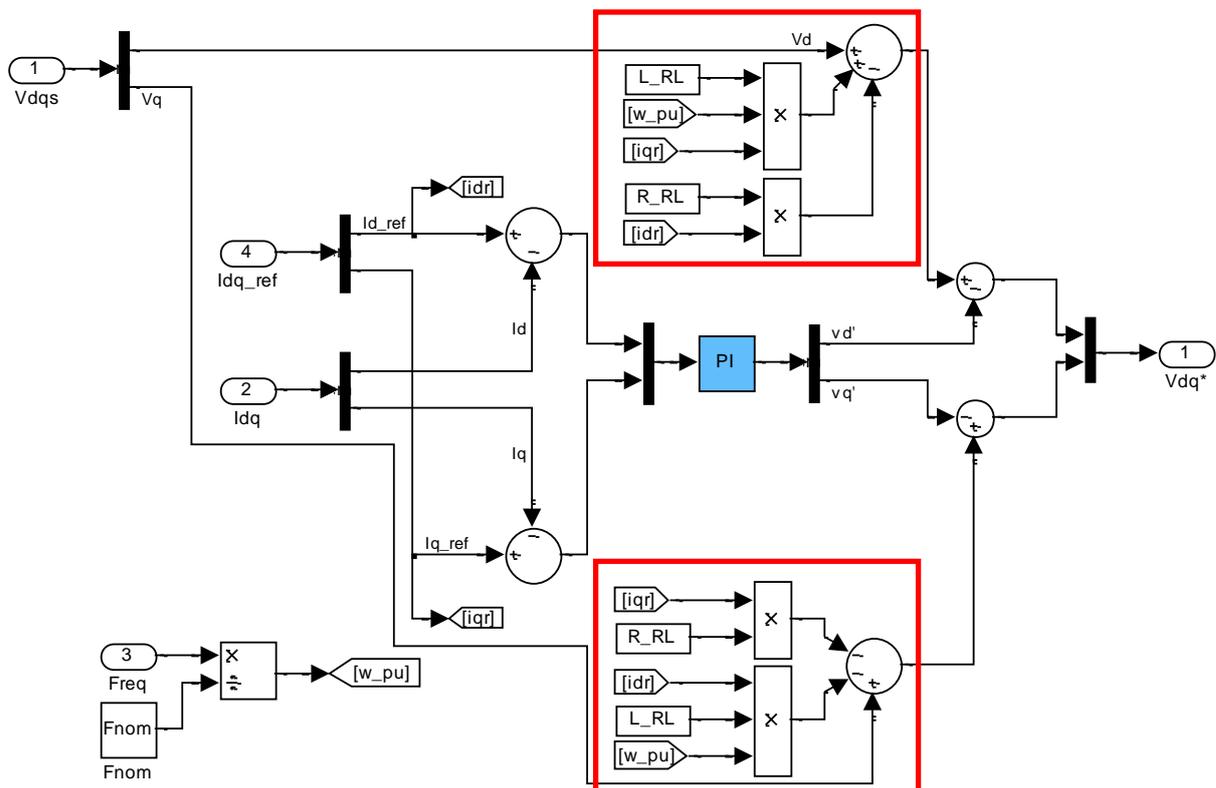
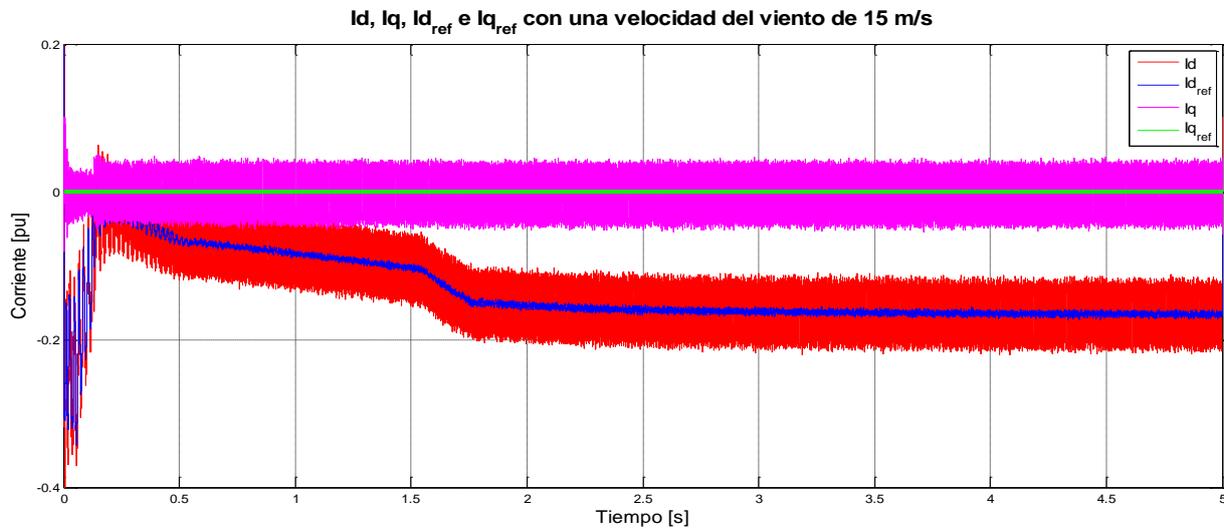
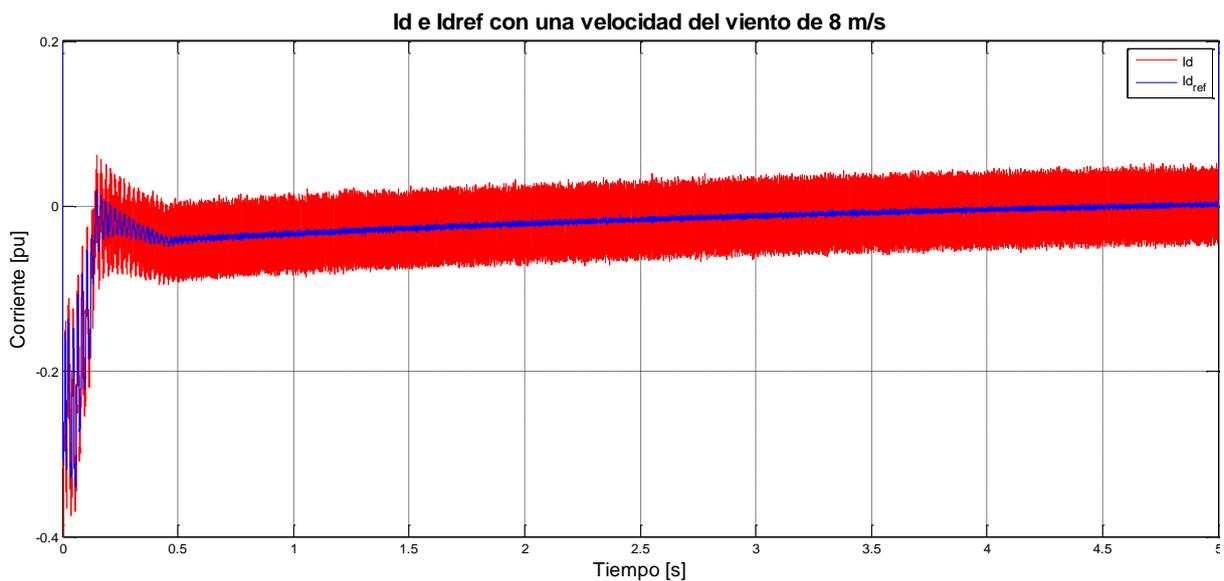




Figura 45 Regulador de corriente

En las siguientes figuras se puede ver cómo funciona el regulador de corriente a dos velocidades del viento diferentes 15 y 8 m/s. Se ve como los valores de  $I_d$  e  $I_q$  siguen a sus respectivos valores de referencia y como varían la  $I_d$  y la  $I_q$  con la velocidad del viento.

Figura 46  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_{d_{ref}}$  e  $I_{q_{ref}}$  con una velocidad del viento de 15 m/sFigura 47  $I_d$  e  $I_{d_{ref}}$  con una velocidad del viento de 8 m/s

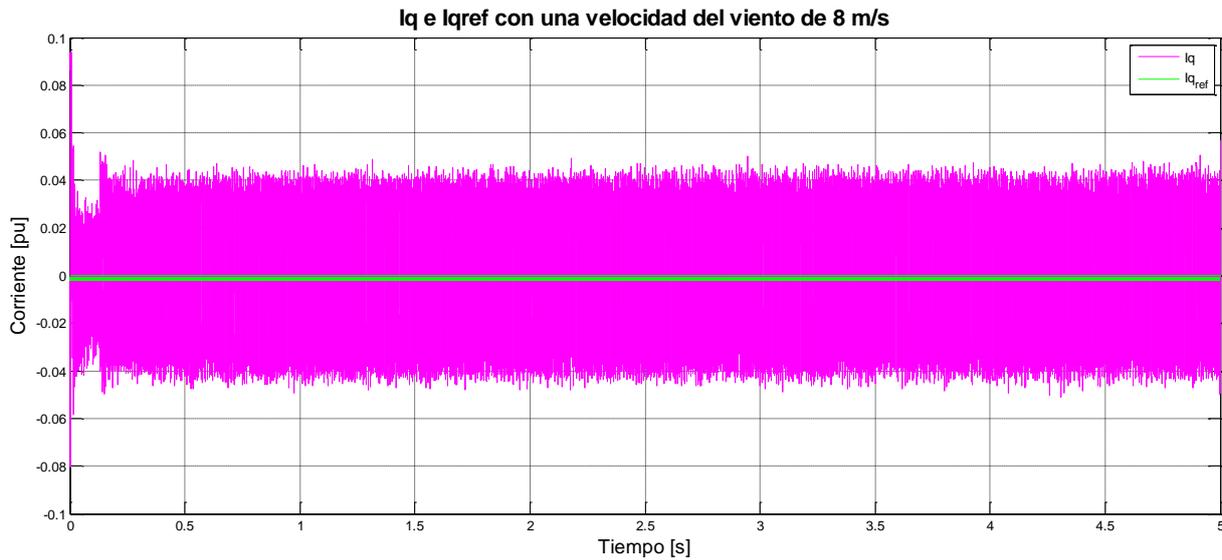


Figura 48 Iq e Iq<sub>ref</sub> con una velocidad del viento de 8 m/s

Una vez obtenidos los valores  $V_d^*$  y  $V_q^*$  es necesario volver a pasar este valor a un sistema trifásico de tensiones, se requiere el índice de modulación ( $m$ ) para obtener un voltaje generado de 1 pu por el convertidor. El cálculo del índice de modulación se realiza por medio de la ecuación Ec. 31 donde  $V_{dc}=1200$  V y  $V_{nom}=690$  V.

$$m = \frac{V_{nom} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}}{V_{dc}}$$

Ec. 31

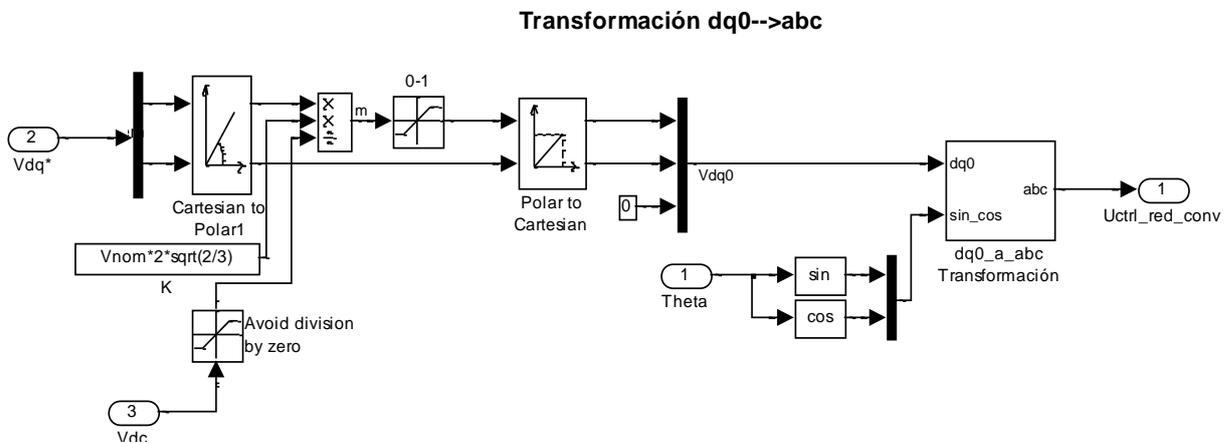
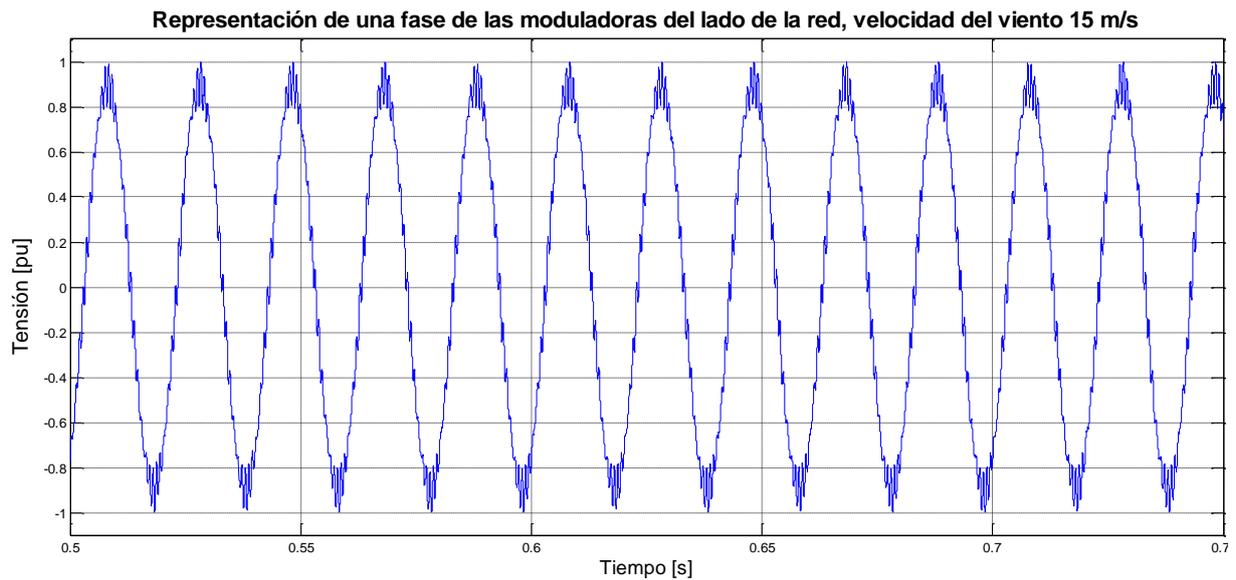
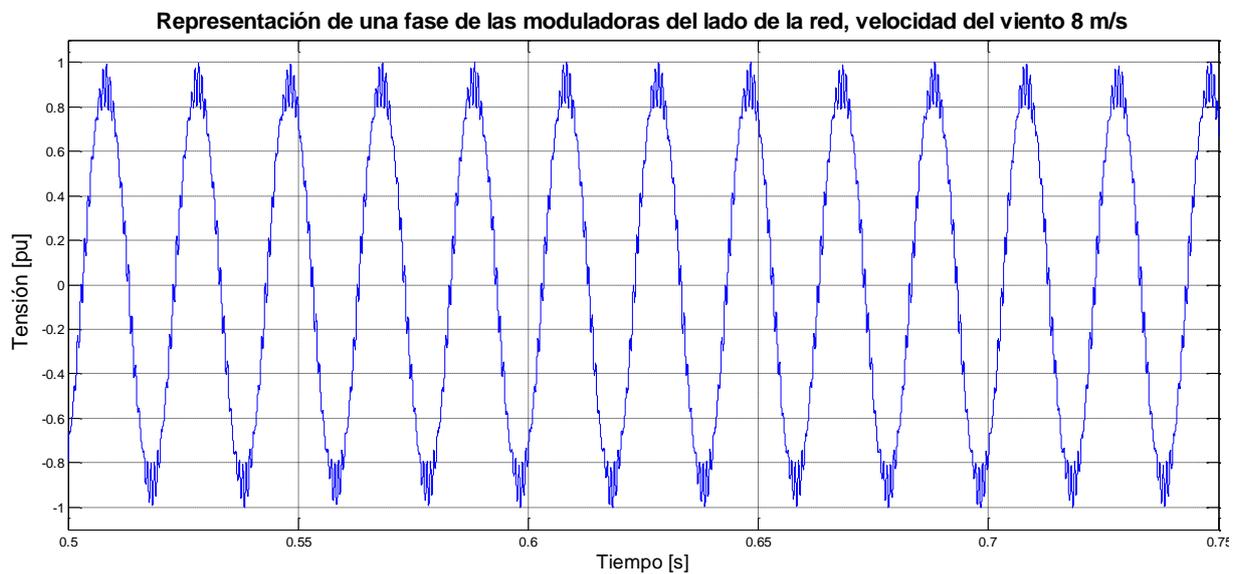


Figura 49 Transformación de ejes d y q a coordenadas trifásicas

A continuación se muestra el resultado que se obtiene del regulador del lado de la red que son las moduladoras.



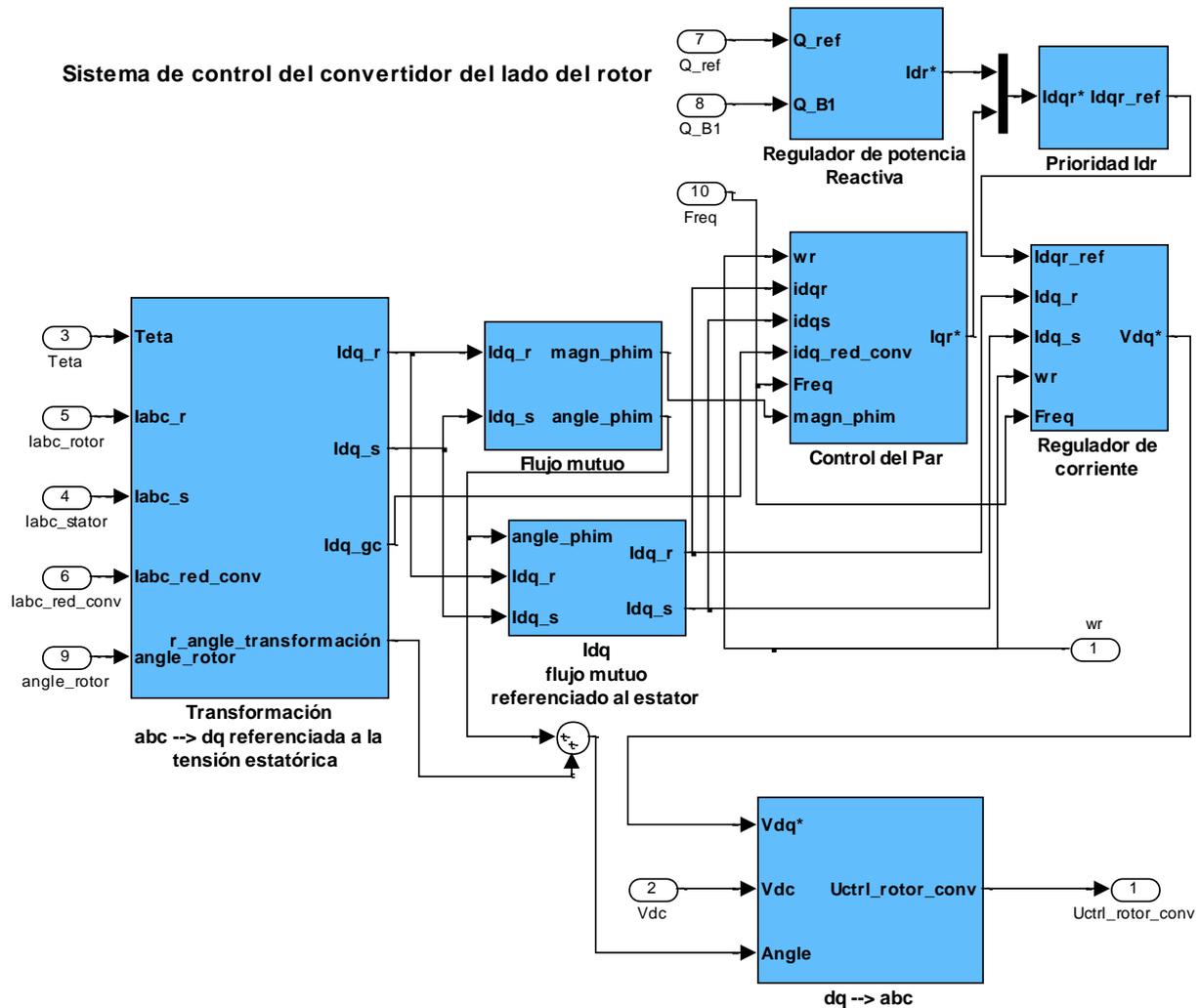
**Figura 50** Representación de una fase de las moduladoras del lado de la red, 15 m/s



**Figura 51** Representación de una fase de las moduladoras del lado de la red, 8 m/s

## 5.2. Sistema de control del convertidor del lado del rotor

El sistema de control del convertidor del lado del rotor se puede ver en la Figura 52, se comentará cada uno de los bloques que forman este control.



**Figura 52** Sistema de control del convertidor del lado del rotor

Como en el sistema de control del convertidor del lado del rotor se comenzará comentando los datos de entrada, que son:

- Potencia reactiva inyectada a la red ( $Q_{B1}$ )
- Potencia reactiva de referencia ( $Q_{ref}$ )
- Se recuerda que la variable  $Teta = w \cdot t$
- La corriente que circula por el convertidor del lado de red ( $I_{labc\_red\_conv}$ )
- Frecuencia red
- Tensión del bus de continua ( $V_{dc}$ )
- Posición/ángulo del rotor ( $angle\_rotor$ )
- Corriente que circula por el estator ( $I_{labc\_stator}$ )



- Corriente que circula por el rotor ( $I_{abc\_rotor}$ )
- Velocidad del rotor ( $w_r$ )

Al tratarse de un control vectorial lo primero es pasar las componentes trifásicas de corriente a componentes dq0, es decir, vectoriales. Esto se hace mediante el bloque Transformación abc→dq0 referenciada a la tensión estática que se puede ver con detalle en la Figura 53. Se recuerda que la señal  $\varepsilon = \text{Teta} = w \cdot t$  (de la tensión de la red).

Como las variables del rotor están referidas al estator la corriente rotórica quedará de la siguiente manera :

$$\text{Ec. 32} \quad [7] \quad I_r \cdot e^{j(\alpha+\varepsilon)} = I_r \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j\varepsilon}$$

Donde  $\alpha$  son las coordenadas polares respecto al eje del rotor y se recuerda que la señal  $\varepsilon = \text{Teta} = w \cdot t$  es el ángulo de rotación del rotor.

Una vez calculados el seno y el coseno de esta señal se pueden obtener  $I_d$  e  $I_q$  provenientes tanto de la red ( $I_{dq\_gc}$ ) como del estator ( $I_{dq\_s}$ ). Sin embargo para calcular las  $I_d$  e  $I_q$  del rotor se requiere además tener en cuenta la posición del rotor ya que se referirán al estator, por tanto hay que restarle a Teta esta posición multiplicada por el número de pares de polos. Así se obtiene la  $I_{dq\_r}$  tras hacer el seno y el coseno de esta última operación.

Siendo las  $I_d$  las señales relacionadas con la potencia reactiva a diferencia del sistema de control del convertidor del lado de la red y las  $I_q$  las relacionadas con el control del par. También se obtiene la relación para transformar los datos del rotor al estator ( $r\_angle\_transformación$ ).

Transformación abc --> dq referenciada a la tensión estática

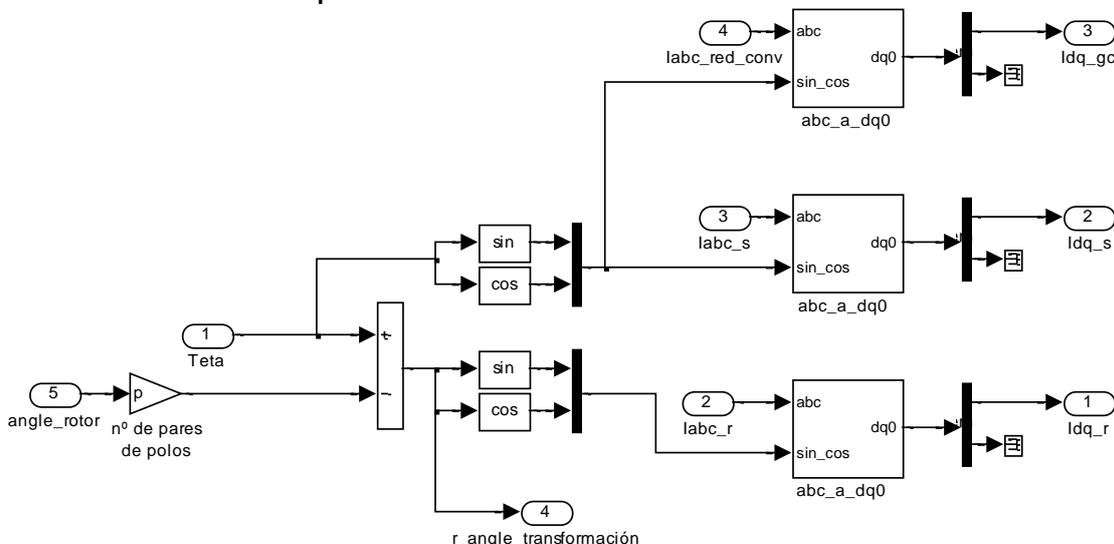
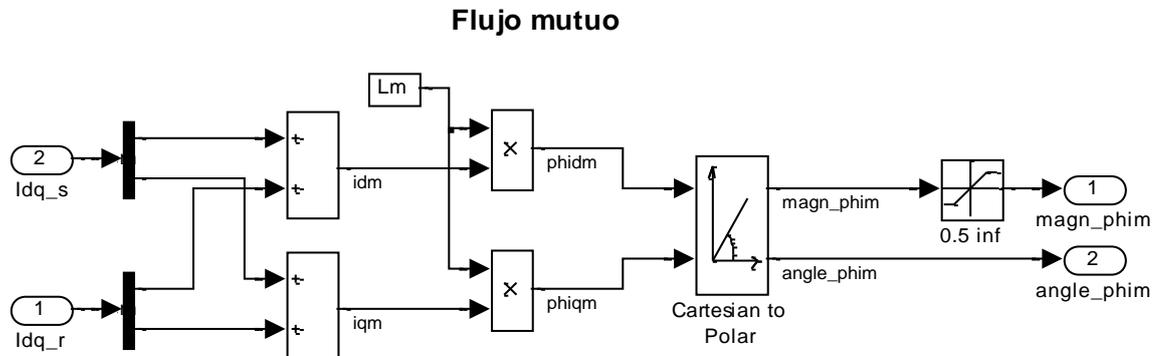


Figura 53 Transformación a ejes d y q

En esta parte del sistema de control del generador las variables de control son las del rotor, sin embargo, las intensidades estática y rotórica están ligadas a través de la intensidad magnetizante de estator y al estar sus variables referidas al estator esta relación se define como:

$$\text{Ec. 33} \quad I_m = I_r + I_s$$

Es por ello que en el bloque flujo mutuo, Figura 54, se realiza las operaciones pertinentes, además se multiplican por la inductancia mutua ya que será necesario más adelante. Se obtiene así la magnitud y el ángulo de la  $I_m$ .



**Figura 54**      **Flujo mutuo**

Es necesario para los cálculos realizar las proyecciones del fasor intensidad del estator y del rotor en la dirección del fasor de flujo y en la dirección perpendicular a esta, esto puede verse en el diagrama vectorial de la Figura 55, lo cual se realiza sencillamente restando el ángulo de de la intensidad magnetizante a las componentes Idq rotórica y estática. Esta operación se lleva a cabo en bloque llamado Idq flujo mutuo referenciado al estator, Figura 56.

En la Figura 55 pueden verse las siguientes componentes:

- Ids, es la proyección del fasor intensidad del estator en la dirección del fasor flujo.
- Iqs, es la proyección del fasor intensidad del estator en la dirección perpendicular del fasor flujo.
- Idr, es la proyección del fasor intensidad del rotor en la dirección del fasor flujo.
- Iqr, es la proyección del fasor intensidad del rotor en la dirección perpendicular del fasor flujo.
- Ims, es la intensidad magnetizante.
- Mag\_phim, es el flujo total estático.



referencia y la que se está consumiendo de la red. Se conecta la  $Q_{ref}$  a un limitador (Rate Limiter) de tasa de crecimiento (100) y decrecimiento (-100), a esta señal se le resta la medida de potencia reactiva real que se está consumiendo de la red, así se obtiene el error.

Este valor se hace pasar por un regulador PI ( $K_p=0,002$ ,  $K_i=5$ ) y un limitador de tasa de crecimiento (200) y decrecimiento (-200). Al final la señal que llegará al control de corriente sera la  $I_{dr}^*$  ya que como ya se había explicado son las  $I_d$  las que afectan al control de la reactiva en el convertidor del lado del rotor como se ve en la ecuación Ec. 34.

$$\text{Ec. 34} \quad Q_s = 3U_s \cdot I_s \cdot \text{sen}\varphi_s = 3U_s \cdot I_{ds}$$

Como:

$$\text{Ec. 35} \quad I_{ds} = \frac{1}{1 + \sigma_s} \cdot (I_{ms} + I_{dr})$$

Donde  $\sigma_s$  es una constante que expresa el cociente entre el flujo de dispersión creado por la corriente estática y el flujo común. Así con las anteriores ecuaciones se tiene:

$$\text{Ec. 36} \quad Q_s = K_Q \cdot (I_{ms} - I_{dr})$$

$$\text{Ec. 37} \quad Q_s = Q_0 - K_Q \cdot I_{dr}$$

En esta última ecuación se aprecia la relación entre la componente en eje d de la corriente rotórica y la reactiva demandada por el generador.

### Regulador de Potencia Reactiva

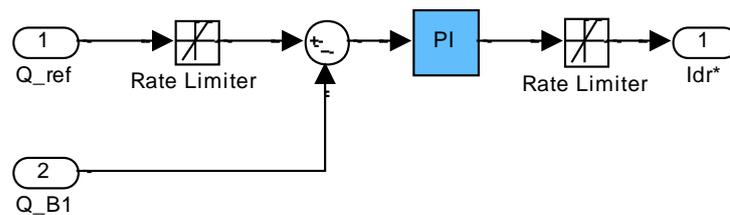


Figura 57 Regulador de potencia reactiva

Otro de los apartados más importantes dentro de este sistema de control es el control del par, para realizar este control serán necesarios los siguientes datos de entrada:

- La corriente que circula por el convertidor del lado de la red ( $I_{abc\_red\_conv}$ )
- Frecuencia red
- Corriente  $I_{dq\_s}$
- Corriente  $I_{dq\_r}$
- Velocidad del rotor ( $w_r$ )
- Módulo de la intensidad magnetizante ( $\text{magn\_phim}$ )



En régimen permanente y en ejes d y q el par queda de la siguiente manera

$$\text{Ec. 38} \quad T_e = \frac{P_{SR}}{\Omega_s} = \frac{3U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi}{\Omega_s} = \frac{3U_s \cdot I_{qs}}{\Omega_s}$$

Ahora bien, dado que en este sistema el convertidor de frecuencia se encuentra conectado en el rotor de la máquina, las variables de control son las variables del rotor. Sin embargo, las intensidades estática y rotórica están ligadas a través de la intensidad magnetizante de estator que se define como:

$$\text{Ec. 39} \quad I_{ms} = -I_s \cdot (1 + \sigma_s) - I_r$$

Si la tensión aplicada al estator es constante, el flujo en la máquina es constante y la intensidad magnetizante de estator también lo es. Por tanto, la intensidad estática es proporcional a la suma de la intensidad rotórica y de un término constante:

$$\text{Ec. 40} \quad I_s = \frac{1}{1 + \sigma_s} \cdot (-I_{ms} - I_r)$$

Dado que la intensidad magnetizante de estator está en fase con el flujo, las componentes activas de los fasores intensidad de rotor y estator son proporcionales, tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 41} \quad I_{qs} = \frac{-I_{qr}}{1 + \sigma_s}$$

Mediante las ecuaciones Ec. 38 y Ec. 41 se puede expresar el par en función de la componente q de la corriente rotórica:

$$\text{Ec. 42} \quad T_e = -K_T \cdot I_{qr}$$

A continuación se muestran dos gráficas en las que se representan de forma simultánea el par y la componente  $I_{qr}$  que permitirá comprobar esta relación de proporcionalidad. La Figura 58 corresponde a un par mayor que la Figura 59 y por tanto la  $I_{qr}$  es mayor en el primer caso que en el segundo.

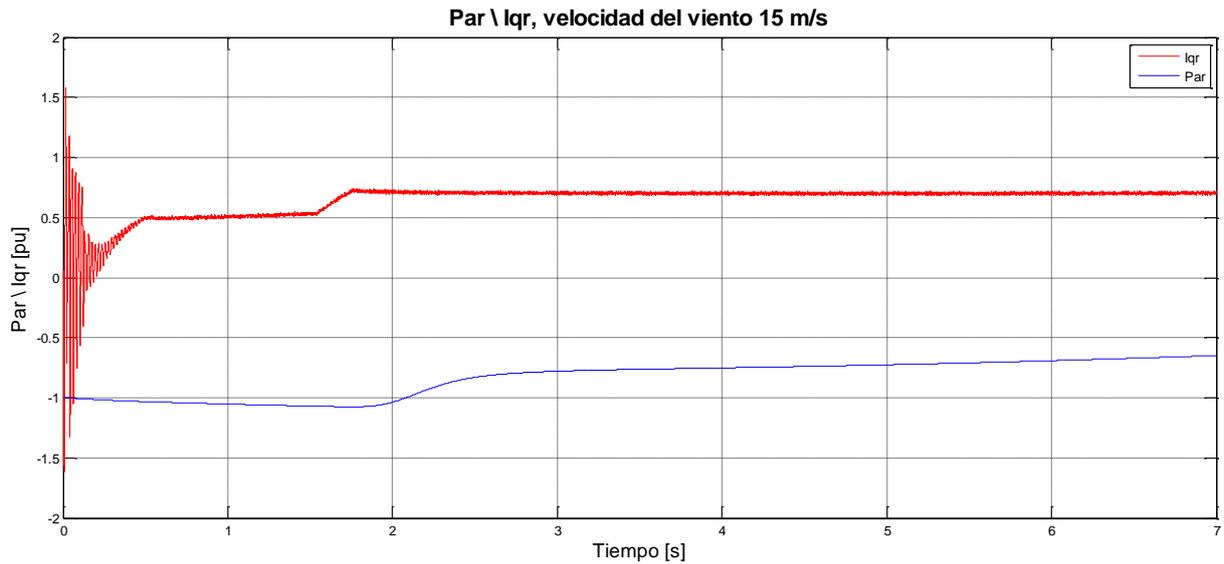


Figura 58 Par\I<sub>qr</sub>, velocidad del viento 15 m/s

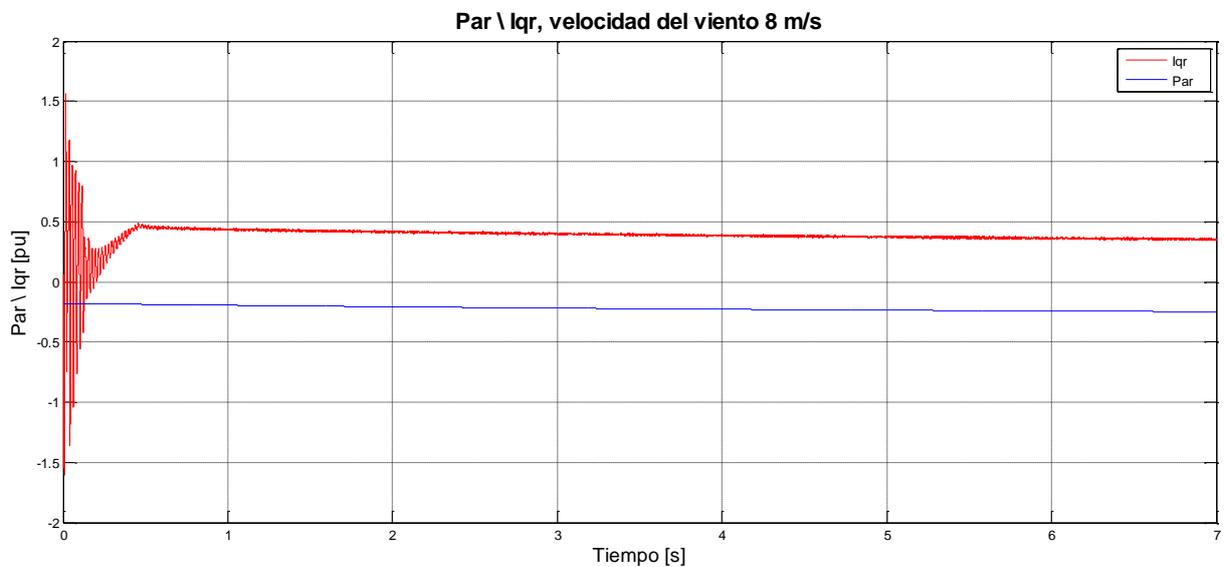


Figura 59 Par\I<sub>qr</sub>, velocidad del viento 8 m/s

Se puede ver como la señal del par sigue la Iqr.

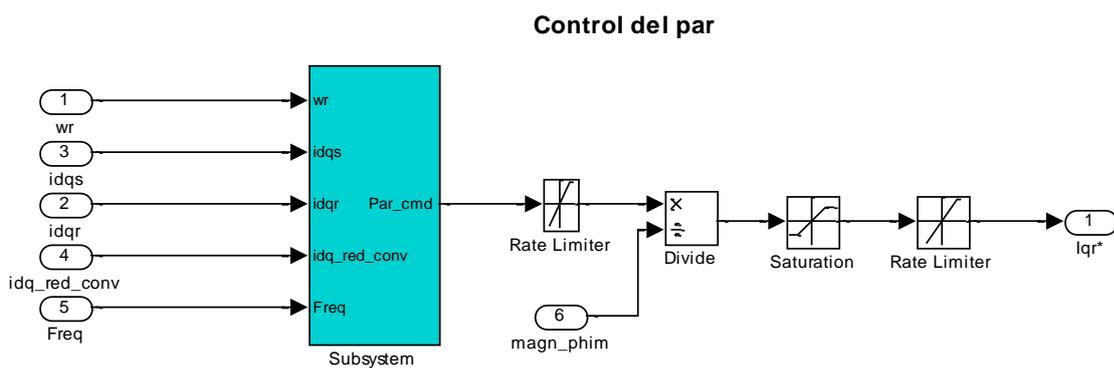


Figura 60 Control del par



Después de introducir parte de dichos datos en un subsistema que se explicará a continuación se obtiene la señal de salida de regulación del par esta se conecta a un limitador (Rate Limiter) de tasa de crecimiento (1) y decrecimiento (-1), esta señal se divide entre la intensidad magnetizante. El cociente resulta ser proporcional a la corriente de referencia del rotor referida al eje en cuadratura. El resultado del cociente se lleva a un bloque de saturación que limita sus valores entre 0 y 1, al tratarse de variables expresadas en valores por unidad. Se conecta a un limitador de tasa de crecimiento (200) y decrecimiento (-200). Al final la señal que llegará al control de corriente será la  $I_{qr}^*$ , son las  $I_q$  las que afectan al control del par en el convertidor del lado del rotor como se ve en la Figura 60. En la siguiente ecuación se puede ver la relación que existe entre el par y la  $I_{qr}$  en régimen transitorio.

$$\text{Ec. 43} \quad T_e = -\frac{2}{3} \cdot (1 - \sigma) \cdot L_r \cdot i_{ms} \cdot i_{qr}$$

El subsistema de control del par tiene como función dar una señal del par de referencia que obtiene después de sacar la potencia eléctrica de referencia. Para ello cuenta con una entrada principal, la velocidad del rotor, además es necesario conocer los puntos característicos de la curva velocidad del rotor-potencia medidos en valores por unidad, así como la potencia generada a estas velocidades.

En la tabla siguiente se muestran cuatro puntos de funcionamiento de la máquina con los que se reconstruirá la curva de funcionamiento del generador. Con esta curva se establecen los puntos de funcionamiento que el esquema de control tratará de seguir. Con esos puntos el sistema de control será capaz de seguir mediante el ajuste de la componente en eje q de la corriente de rotor. La potencia expresada en valores por unidad está referida a la potencia mecánica nominal de la máquina, mientras que la velocidad, expresada también en valores por unidad, se encuentra referida a la velocidad de sincronismo de la máquina.

	Velocidad [pu]	Potencia [pu/P <sub>mec</sub> ]
A	0,7	0
B	0,71	0,1512
C	1,2	0,73
D	1,21	1

**Tabla 2** Valores de velocidad y potencia en cuatro puntos de funcionamiento

Con estos datos es posible tener en cuenta la parte de la grafica, Figura 65, en la que está trabajando el sistema. Los bloques, que se ven en la parte superior de la Figura 64, funcionan atendiendo a las siguientes ecuaciones:

- En rojo:

$$\text{Ec. 44} \quad X = (w_r - \text{velocidad}_C) \cdot \frac{\text{potencia}_D - \text{potencia}_C}{\text{velocidad}_D - \text{velocidad}_C}$$

- En verde:

$$\text{Ec. 45} \quad \text{Si } w_r < \text{velocidad}_B \rightarrow Y = (w_r - \text{velocidad}_A) \cdot \frac{\text{potencia}_B - \text{potencia}_A}{\text{velocidad}_B - \text{velocidad}_A}$$



Ec. 46 
$$Si w_r \geq velocidad\_B \rightarrow Y = \left( \frac{w_r}{velocidad\_C} \right)^3 \cdot potencia\_C$$

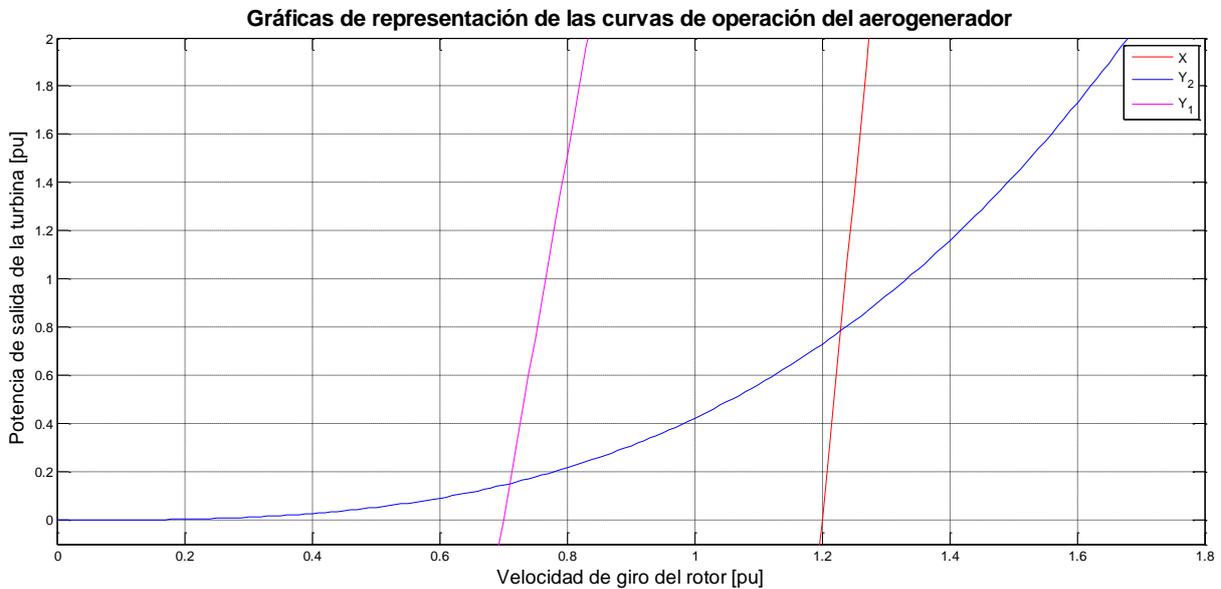


Figura 61 Gráficas de representación de las curvas de operación del aerogenerador X, Y<sub>1</sub> e Y<sub>2</sub>

- En azul:

Ec. 47 
$$Z = (X + Y) \cdot \frac{P_{mec}}{P_{nom}}$$

$\frac{potencia\_B - potencia\_A}{velocidad\_B - velocidad\_A}$  Representa la pendiente de la curva desde A hasta B, lo mismo ocurre con C y D, esto se puede ver en la Figura 62.

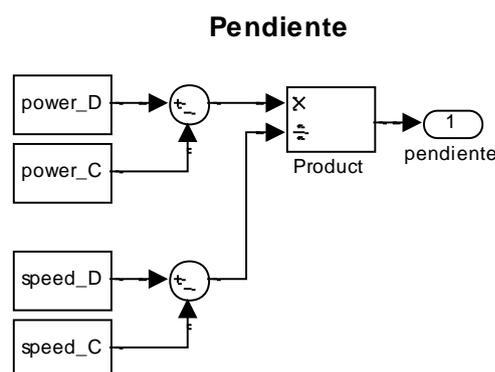
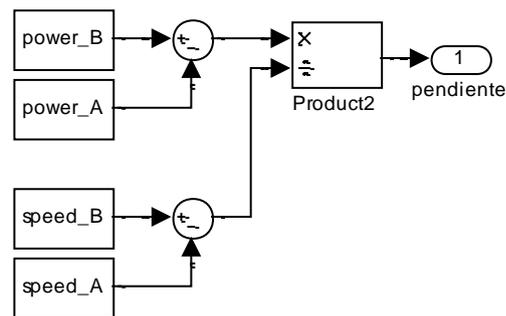
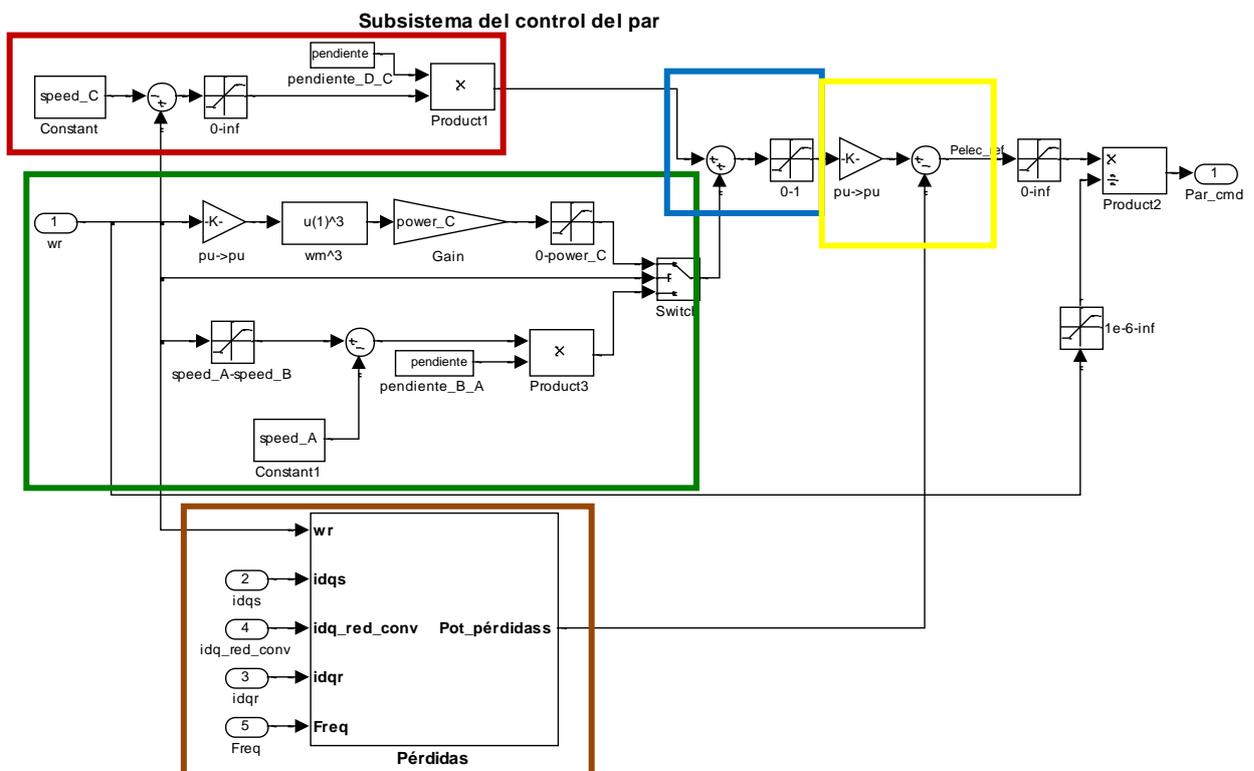
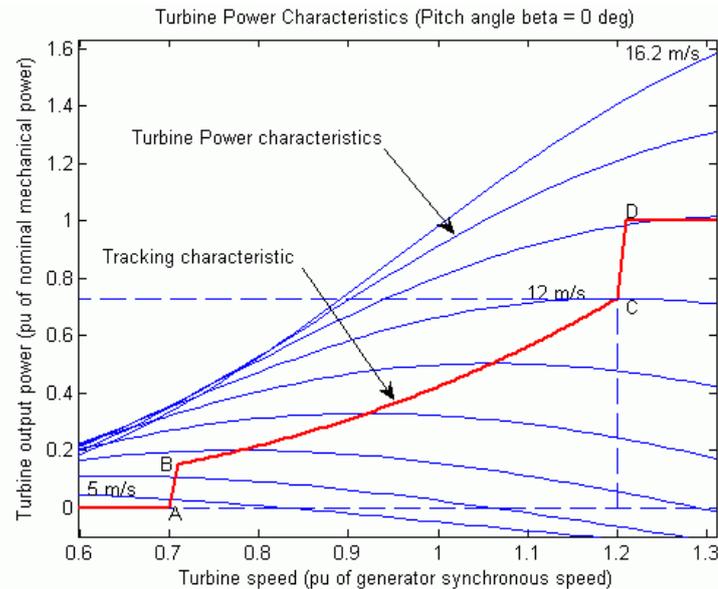


Figura 62 Cálculo de la pendiente C-D

**Pendiente**

**Figura 63 Cálculo de la pendiente A-B**

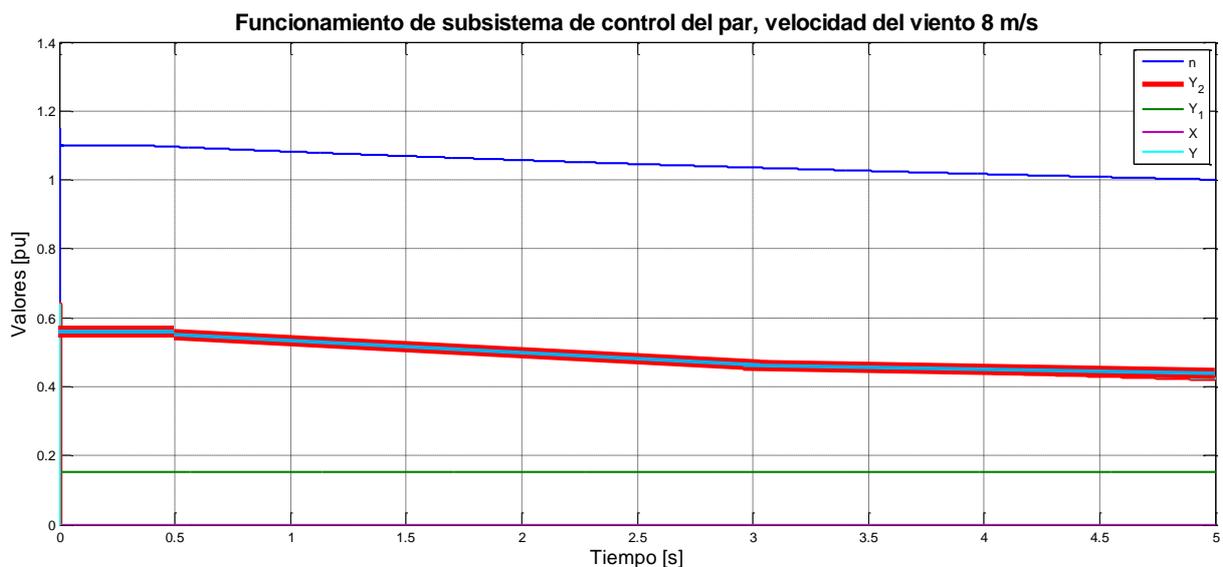
El sistema de control realiza el seguimiento del punto de máxima potencia de tal forma que siempre trabaja en alguna de las curvas vistas anteriormente X, Y<sub>1</sub> o Y<sub>2</sub> esto se hace bien mediante el limitador que esta recuadrado en rojo en la Figura 64, que hace que si la velocidad está por debajo de la velocidad en el punto C el valor de X sea 0 por tanto la Z dependería solo de Y<sub>1</sub> o Y<sub>2</sub> que se seleccionan mediante un conmutador dependiendo de la velocidad del rotor.


**Figura 64 Subsistema de control del par**



**Figura 65** Curvas de potencia un generador cualquiera frente a la curva de máxima potencia

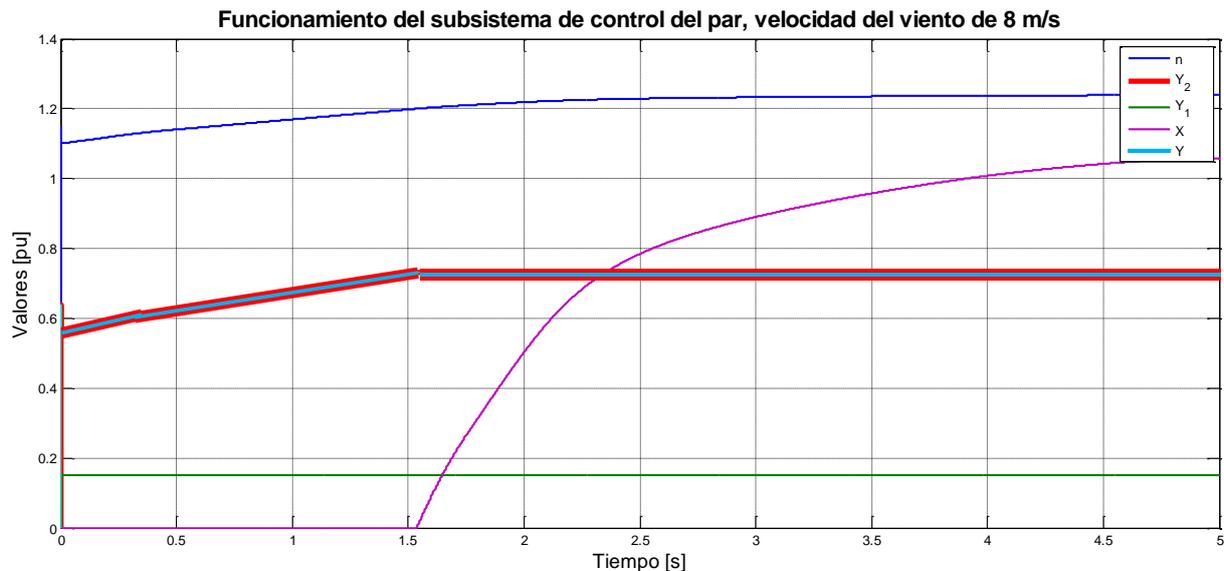
A continuación se muestra una gráfica donde se ven los valores que toman las variables anteriores para dos velocidades del viento 8 y 15 m/s. En la primera, Figura 66, se muestra como al ser la velocidad de giro del rotor inferior a la velocidad en el punto C, X es igual a cero y como al ser así mismo superior a la velocidad en el punto B la Y toma el valor de la  $Y_2$  que corresponde a la parábola. Por tanto en  $t = 5$  s, la velocidad de la máquina (en azul en la fig. 157) es de aproximadamente 1 por unidad y la potencia de aproximadamente 0,42 por unidad.



**Figura 66** Funcionamiento del subsistema de control del par según las ecuaciones anteriores para una velocidad del viento de 8 m/s



En la siguiente gráfica puede verse como cuando la velocidad de giro del rotor supera la velocidad en el punto C, entonces X deja de valer cero, como la velocidad sigue siendo mayor que en el punto B la Y continua tomando el valor de la  $Y_1$ .



**Figura 67** Funcionamiento del subsistema de control del par según las ecuaciones anteriores para una velocidad del viento de 8 m/s

Queda ahora calcular las pérdidas de potencia que son tanto eléctricas como mecánicas. Las pérdidas eléctricas se dan en el cobre del rotor y del estator así como en la resistencia de la inductancia de filtrado de choque del convertidor (choke) que contiene una resistencia, mientras que las pérdidas mecánicas se tienen debido a la fricción. En la Figura 68 se ve el cálculo de estas pérdidas que atiende a las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ec. 48} \quad P_{\text{fricción}} = w_r \cdot (w_r \cdot F)$$

$$\text{Ec. 49} \quad P_{\text{estator}} = R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$$

$$\text{Ec. 50} \quad P_{\text{rotor}} = R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2)$$

$$\text{Ec. 51} \quad P_{\text{choke}} = R_{RL} \cdot (I_{d\_red\_conv}^2 + I_{q\_red\_conv}^2)$$

- En marrón en la Figura 64:

$$\text{Ec. 52} \quad \text{Pérdidas} = P_{\text{fricción}} + P_{\text{estator}} + P_{\text{rotor}} + P_{\text{choke}}$$

Las Pérdidas se hacen pasar por un bloque que calcula el valor medio de la entrada ( $I_n$ ) durante un ciclo de la frecuencia de entrada, con esto ya se tiene la señal Pot\_pérdidas.



Se puede ahora hacer el cálculo de la potencia eléctrica de referencia con una sencilla operación que se muestra a continuación, y puede verse reflejada en el modelo en la Figura 64 recuadrada en amarillo:

$$\text{Ec. 53} \quad P_{elec\_ref} = Z - Pot\_p\acute{e}rdidas$$

Queda ahora calcular la señal del par que como se vio anteriormente se transformará en la corriente  $I_q^*$ , este cálculo consiste en lo siguiente:

$$\text{Ec. 54} \quad Par\_cmd = \frac{P_{elec\_ref}}{w_r}$$

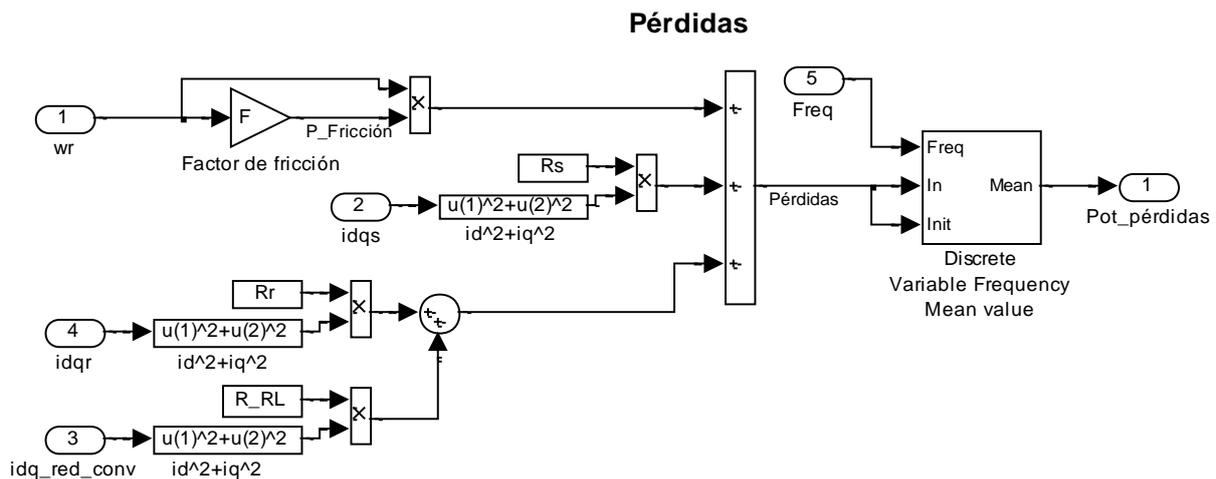
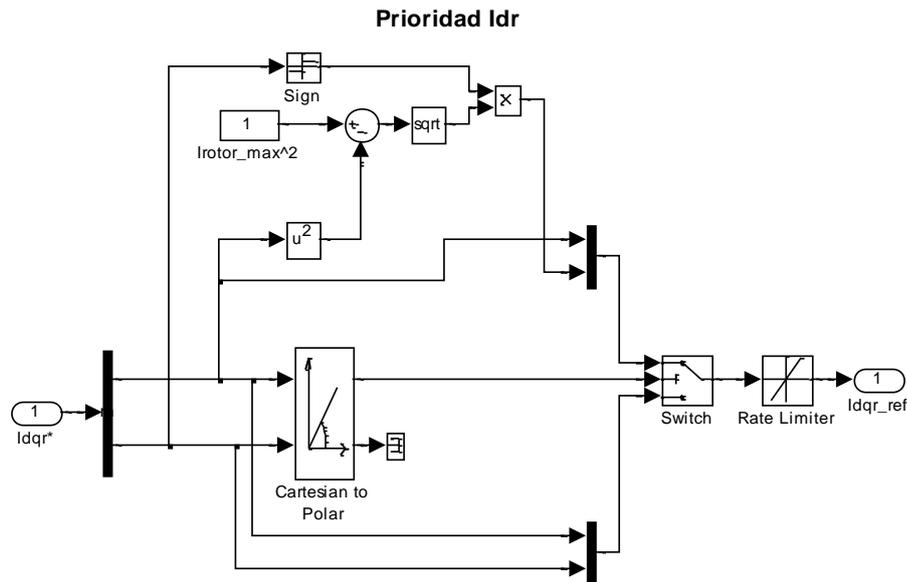


Figura 68 Cálculo de las pérdidas

Se tienen en este momento las señales  $I_d^*$  e  $I_q^*$  que serán las que determinen la regulación de la potencia reactiva y del par respectivamente, sin embargo todavía se necesita otra operación, Figura 69. Se hacen pasar estas señales por un limitador que vigila el par similar en funcionamiento al que existe para el convertidor del lado de la red aunque este último controle la reactiva que consume el convertidor.

El conmutador funciona de la siguiente forma, cuando la  $\sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}$  es menor que la  $I_{red}$  máxima que tolera el convertidor el conmutador deja pasar la  $I_d$  y la  $I_q$  tal como vienen, sin embargo si  $\sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}$  es mayor o igual que la  $I_{red}$  máxima se limita la  $I_q$ , el valor de  $I_d$  se mantiene constante en ambos casos. Después se conecta a un limitador (Rate Limiter) de tasa de crecimiento (200) y decrecimiento (-200), ya se han obtenido los valores de  $I_d$  de referencia.



**Figura 69      Prioridad Idr**

Se puede efectuar ahora el autentico control, esto se hace mediante el regulador de corriente, Figura 76, el sistema de control impone las corrientes ajustando las señales moduladoras con las que se obtienen los pulsos PWM de disparo del convertidor. Partiendo de la frecuencia que se mide en la red y de la frecuencia nominal  $f_n = 50\text{Hz}$ , se puede obtener la frecuencia del rotor. Se obtiene  $w_s$  a este valor se le resta la velocidad del rotor  $w_r$  se obtiene así  $w_s - w_r$  que sería la pulsación angular del rotor.

El inversor rotórico funciona como una fuente de tensión (VSI), por lo que para imponer las corrientes de referencia al rotor es necesario hallar las tensiones rotóricas requeridas. Esto se realiza mediante dos lazos de control de corriente según los ejes d y q. Los reguladores de corriente determinan los valores de las tensiones de referencia del inversor necesarias para imponer las corrientes de consigna al rotor de la máquina. Las ecuaciones Ec. 55 y Ec. 56 muestran que es posible realizar el control de la corriente en cada eje actuando sobre los valores de tensión en ejes d y q. A los términos  $V_d$  y  $V_q$  así obtenidos se les añaden dos fuerzas electromotrices,  $\Delta V_d$  y  $\Delta V_q$  que responden a las ecuaciones Ec. 57 y Ec. 58, dependientes del error existente entre cada una de las corrientes medidas ( $I_d$  e  $I_q$ ) y la corriente de referencia prevista en cada eje.

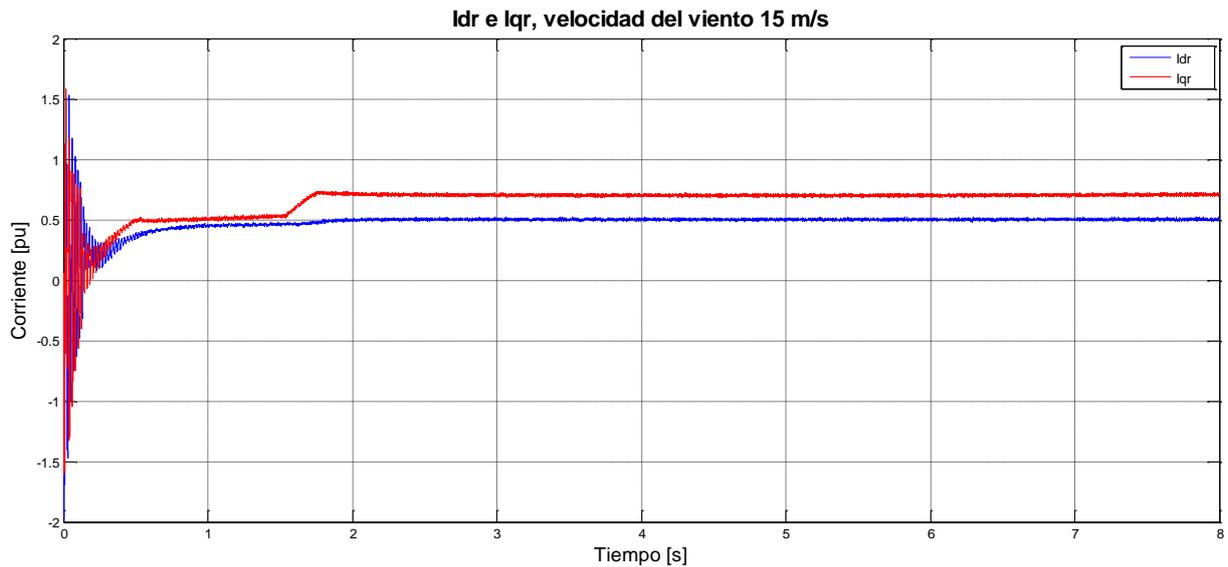
$$\text{Ec. 55} \quad V_d = R_r \cdot I_{dr} - (L_{lr} + L_m)(w_s - w_r)I_{qr} - L_m \cdot I_{qs} \cdot (w_s - w_r)$$

$$\text{Ec. 56} \quad V_q = R_r \cdot I_{qr} + (L_{lr} + L_m)(w_s - w_r)I_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \cdot (w_s - w_r)$$

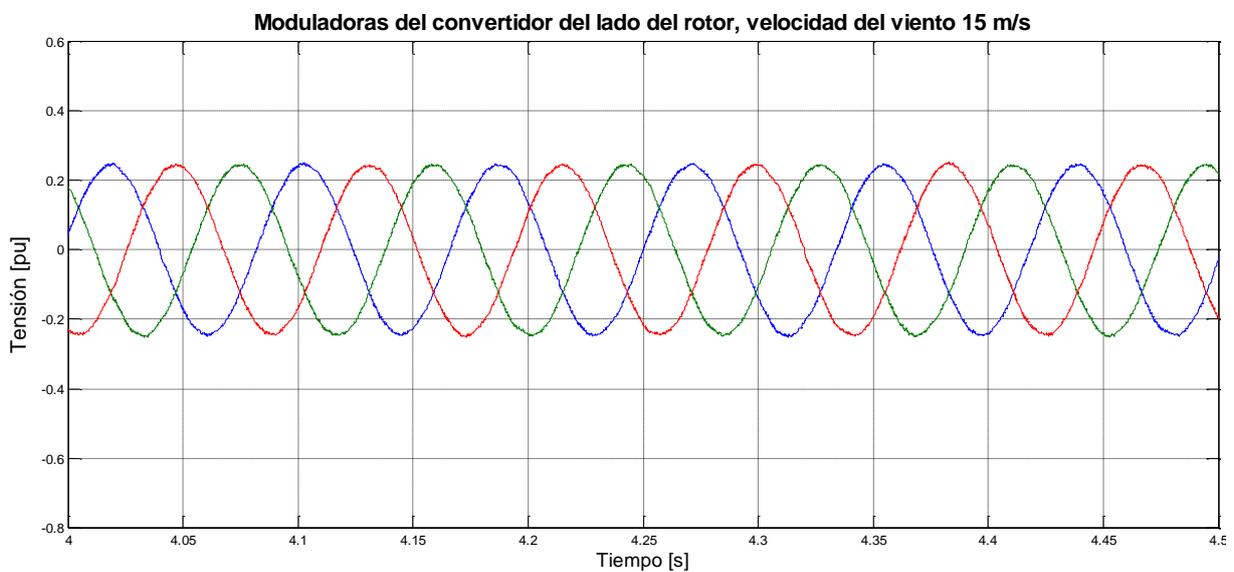
$$\text{Ec. 57} \quad \Delta V_d = v d' = k_p \cdot (I_{dref} - I_d) + k_i \cdot \int (I_{dref} - I_d) \cdot dt$$

$$\text{Ec. 58} \quad \Delta V_q = v q' = k_p \cdot (I_{qref} - I_q) + k_i \cdot \int (I_{qref} - I_q) \cdot dt$$

A continuación se representan dos situaciones distintas donde se ve como en realidad el ajuste de  $I_{dr}$  e  $I_{qr}$  se establece a partir del ajuste de la amplitud y desfase de las moduladoras.

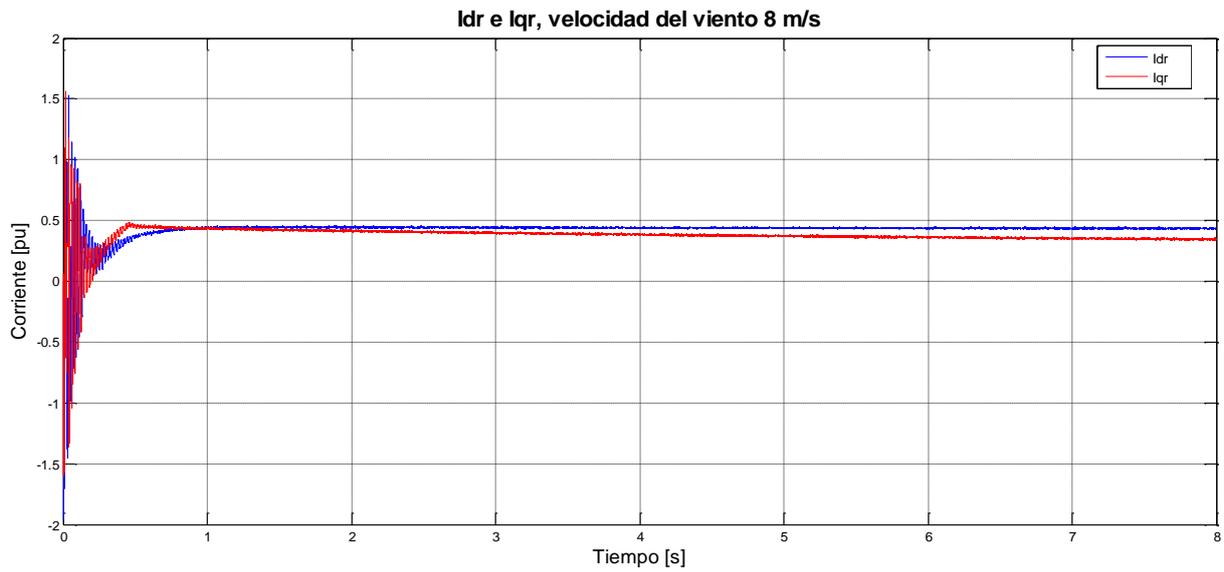


**Figura 70**  $I_{dr}$  e  $I_{qr}$ , velocidad del viento 15 m/s

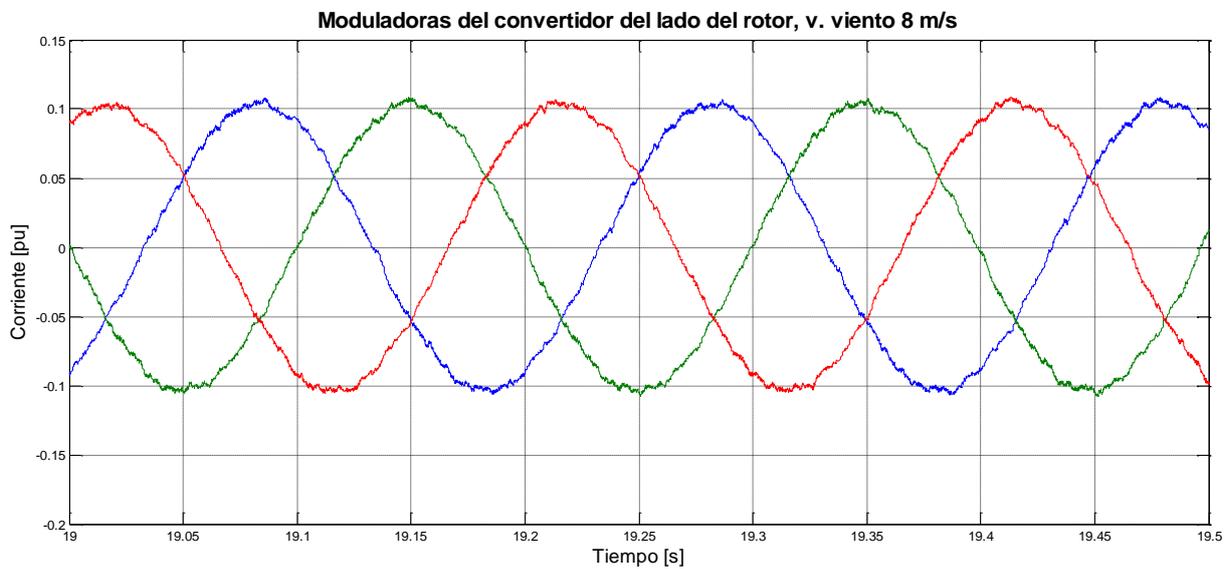


**Figura 71** Moduladoras del convertidor del lado del rotor, v. viento 15 m/s

Como se verá en comparación con las siguientes gráficas la diferencia tanto de amplitud como de frecuencia de las moduladoras es notable. La amplitud y frecuencia de la tensión de salida se ajustan variando la amplitud y frecuencia de la moduladora, por esto las diferencias son tan importantes ya que repercuten directamente en la onda PWM con la que se alimenta el rotor, esto es lo que permite que a través del rotor se pueda aportar o absorber potencia de la red. Estas diferencias vienen de las que existen entre las  $I_{dr}$  y las  $I_{qr}$ .

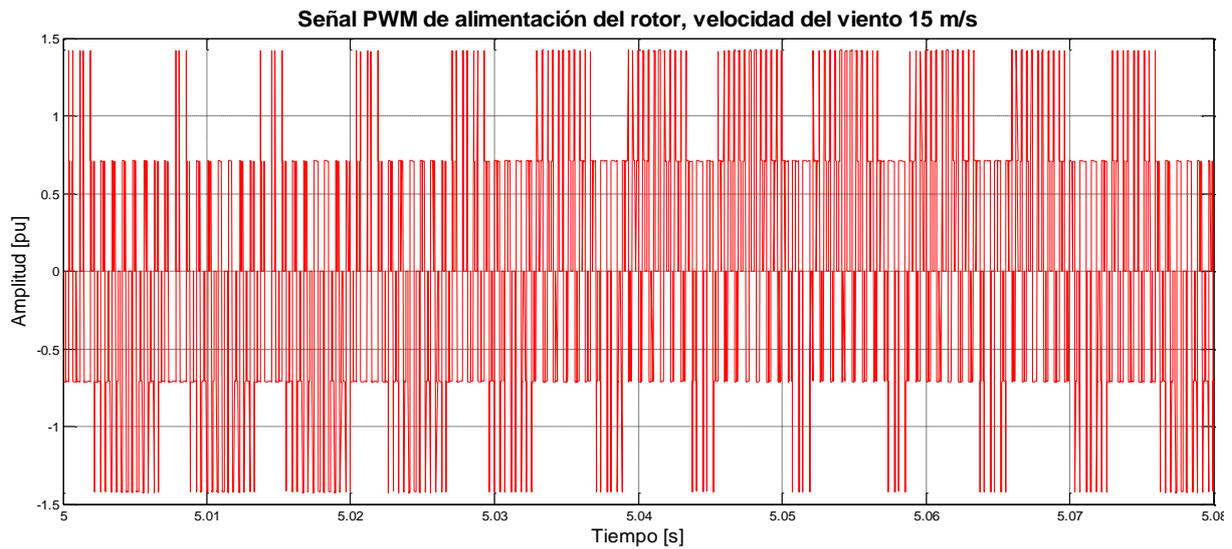


**Figura 72** Idr e Iqr, velocidad del viento 8 m/s

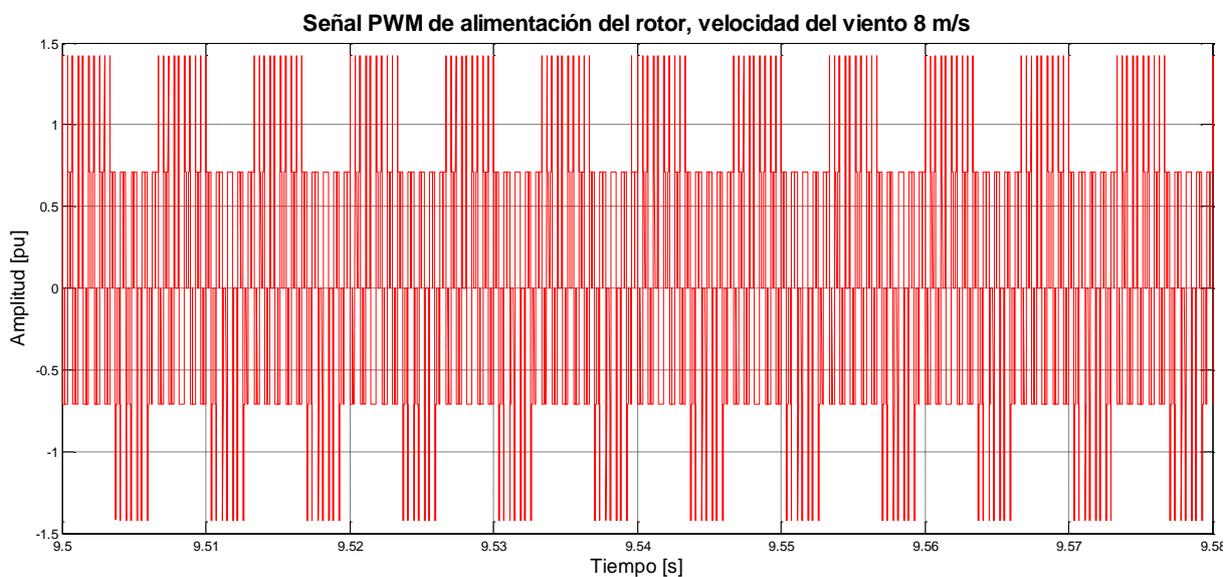


**Figura 73** Moduladoras del convertidor del lado del rotor, v. viento 8 m/s

A continuación se pueden ver una fase de las señales PWM con las que se alimenta el rotor a unas velocidades del viento de 15 y 8 m/s.



**Figura 74** Señal PWM de alimentación del rotor, velocidad del viento 15 m/s



**Figura 75** Señal PWM de alimentación del rotor, velocidad del viento 8 m/s

Se puede ver como las dos ondas son distintas en cuanto a la forma y frecuencia, es decir, tanto la amplitud como la frecuencia de alimentación.

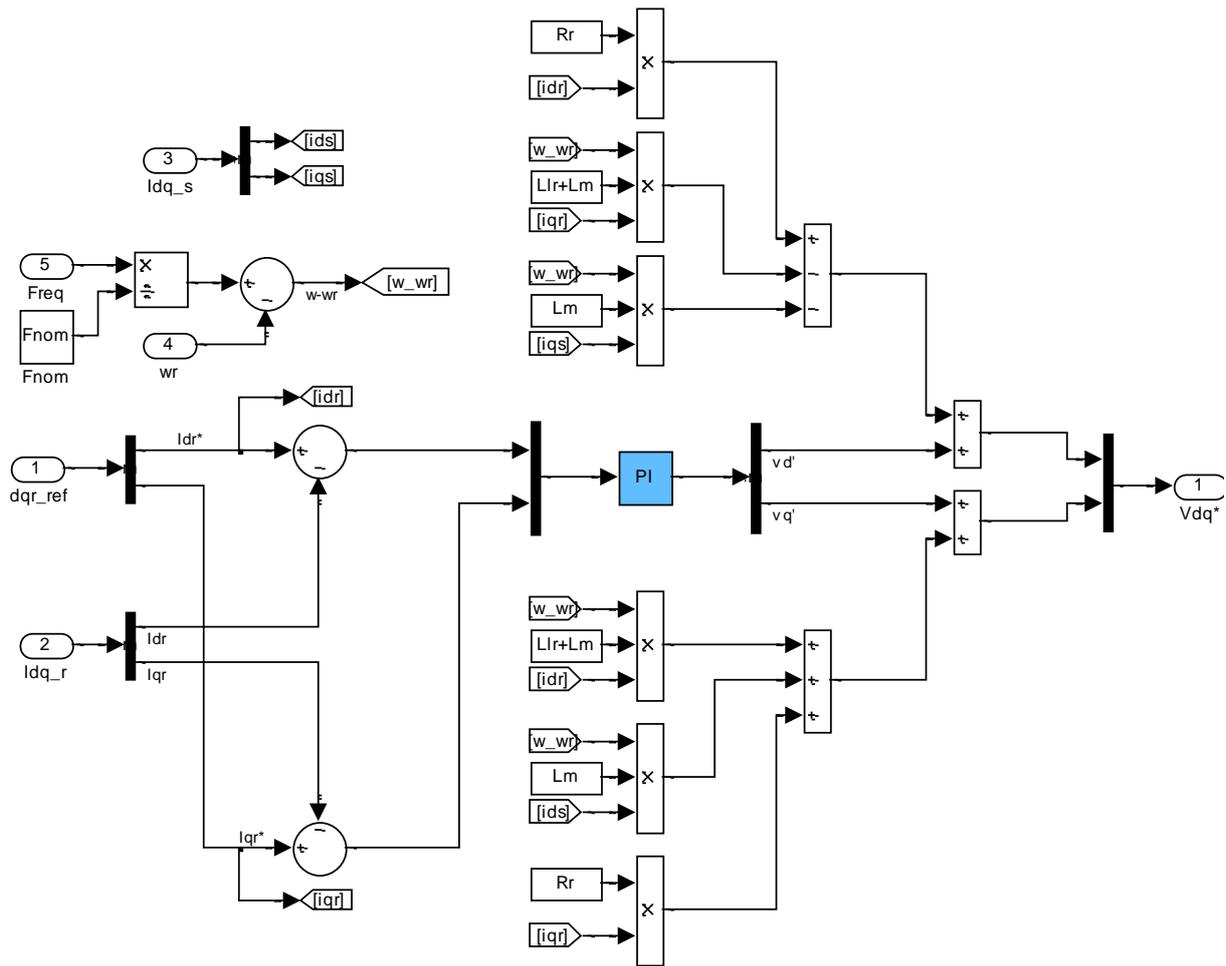


Figura 76 Regulador de corriente

Finalmente para realizar la modulación de tensión en el inversor se requiere transformar los valores de tensión de referencia en coordenadas de campo a tensiones de referencia en coordenadas de rotor, deshaciendo la transformación de Park. Para realizar esta transformación se precisa conocer la posición del campo magnético en coordenadas de rotor. En el modelo una vez obtenidos los valores  $V_d^*$  y  $V_q^*$  el cálculo del índice de modulación se realiza por medio de la ecuación Ec. 31 donde  $V_{dc}=1200$  V y  $V_{nom}=690$  V.

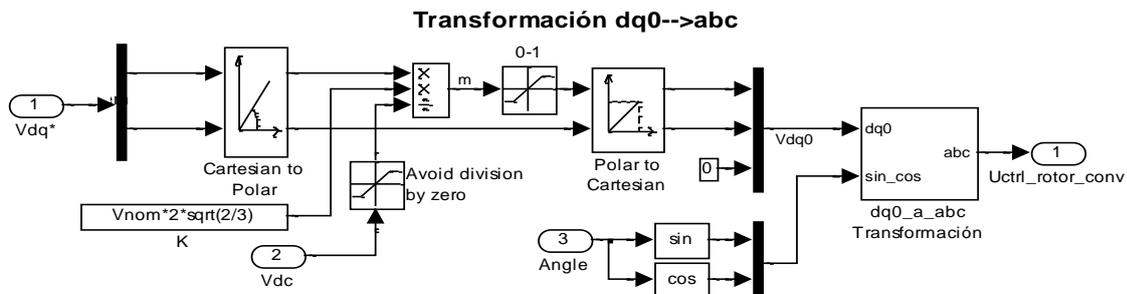


Figura 77 Transformación de ejes d y q a coordenadas trifásicas

## 6. MEDIDA DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Para reducir la distorsión armónica de la tensión de salida de un inversor se ha de prestar especial atención a la modulación del ancho de pulso de los semiconductores del puente; además se ha de disponer un filtro que proporcione un camino de mínima impedancia a todos los armónicos excepto al fundamental. La mayoría de los filtros empleados con este fin llevan una impedancia serie. En el caso de este modelo se tiene la impedancia de choque (choke), constituida por una resistencia y una inductancia. Este filtro en serie, amortigua las componentes de alta frecuencia en corriente:  $I=U_h/(w \cdot h \cdot L)$ . A mayor frecuencia, mayor impedancia inductiva y menor amplitud de la componente armónica de la corriente.

Se debe elegir el menor filtro posible que permita cumplir los requisitos de calidad exigidos a las variables de salida del inversor. Esta calidad se suele medir con las tasas de distorsión armónica de la tensión (THDu) y de la corriente (THDi) definidas como:

$$THDu(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100$$

Ec. 59

$$THDi(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100$$

Ec. 60

Donde  $U_1$  es el valor eficaz del armónico fundamental de la tensión de fase en el punto de conexión común,  $I_1$  es el valor eficaz del armónico fundamental de la corriente inyectada a la red en el punto de conexión común y  $h$  representa el orden del armónico.

En el modelo solo se lleva a cabo la medida de la THDu, esto se realiza de la siguiente manera:

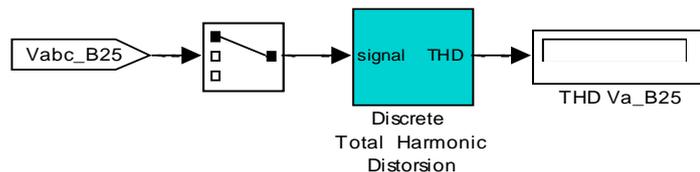
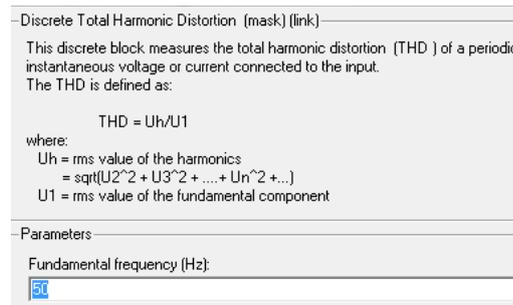


Figura 78 Bloque de medida de la distorsión armónica

La implementación en el modelo de la ecuación Ec. 59 se refleja en la Figura 79.



**Figura 79 Implementación de la medida de la distorsión armónica**

Gracias a las técnicas de modulación del ancho de pulso, los inversores PWM ofrecen un nivel de distorsión armónica reducido. El orden de los armónicos introducidos por el inversor depende de la frecuencia de conmutación de los semiconductores a través del índice de modulación de frecuencia,  $m_f$ , que se define como el cociente entre la frecuencia de conmutación,  $f_s$ , y la frecuencia de componente fundamental de la onda de salida,  $f_1$ .

Para evitar la aparición de componentes subarmónicas en la tensión de salida se debe seleccionar un índice de modulación de frecuencia entero; la modulación recibe entonces el nombre de síncrona. Además por tratarse de un sistema trifásico este índice de modulación tiene que ser múltiplo de tres.

En este caso, y siempre que el inversor trabaje en zona lineal, los armónicos se concentran en bandas centradas en torno a  $m_f$  y sus múltiplos; por lo tanto un incremento de la frecuencia de conmutación conlleva un desplazamiento del espectro armónico hacia armónicos de mayor orden, más fáciles de filtrar, con lo que la calidad de onda mejora. Si además se elige un  $m_f$  impar desaparecen los armónicos de orden par, al cumplirse que la onda tiene simetría impar.

### 6.1. Límites de distorsión armónica en voltaje

El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

Los niveles de distorsión armónica según la norma IEEE 519 para el nivel de tensión que se tiene en el presente proyecto son los que se ven en la Tabla 3, se recuerda que la medida de la distorsión armónica se lleva a cabo a 25 kV.

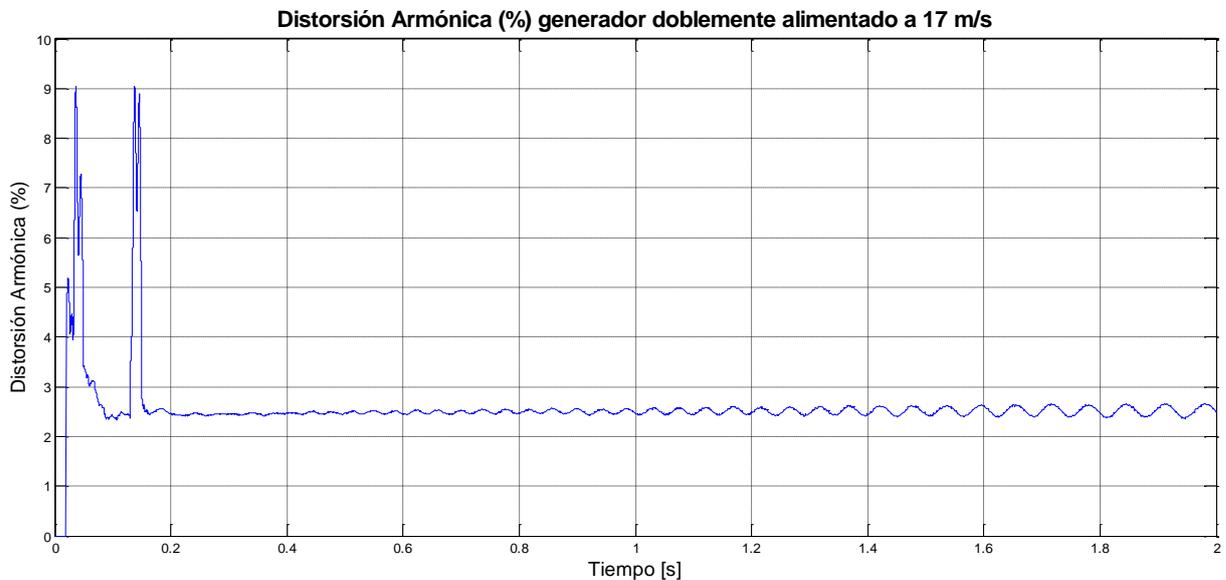
IEEE 519

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la Acometida ( $V_n$ )	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD $V_n$
$V_n < 69$ kV	3.0%	5.0%
$69$ kV $< V_n \leq 161$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 161$ kV	1.0%	1.5%

**Tabla 3 Límites de Distorsión Armónica en Voltaje (IEEE 519)**

Según la norma UNE-EN 50160 la tasa de distorsión armónica total de la tensión suministrada (THD) (comprendidos todos los armónicos hasta el orden 40) no debe sobrepasar el 8%.

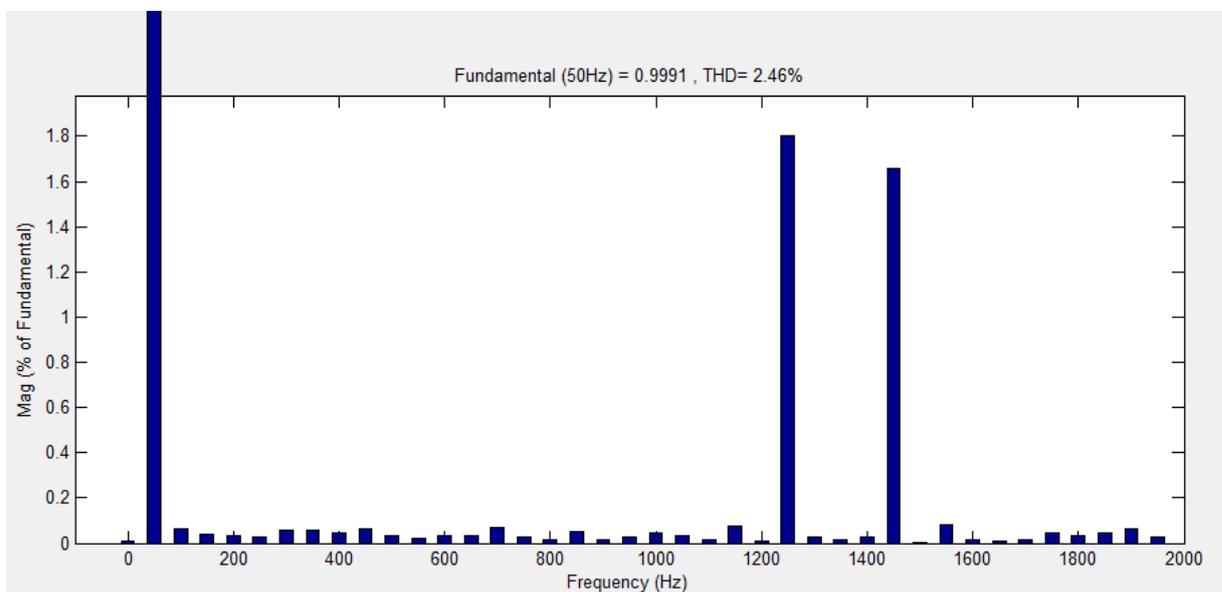
La distorsión en el presente proyecto no llega a superar estos niveles, en la siguiente figura se puede ver un ejemplo.



**Figura 80** Distorsión Armónica (%) generador doblemente alimentado a 17 m/s

Se puede ver cómo solo durante el periodo de arranque la distorsión armónica supera el 5 %, límite a 25 kV, el resto del tiempo la distorsión armónica no supera el 3%.

La aplicación powergui del Matlab permite realizar el análisis de armónicos mediante la transformada rápida de Fourier, esto permite analizar la distorsión armónica individual, además da el valor exacto de la  $THD_u$  en tanto por ciento, en este caso 2,46%, se puede comprobar así que los datos obtenidos anteriormente son correctos.



**Figura 81** Análisis de tensiones mediante la transformada rápida de Fourier



La barra de la Figura 81, que se sale de la gráfica, corresponde a la frecuencia de 50 Hz, la fundamental, es decir, a la que trabaja la red, donde evidentemente el valor de la distorsión armónica es del 100 %.

## 6.2. Límites de distorsión armónica en corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

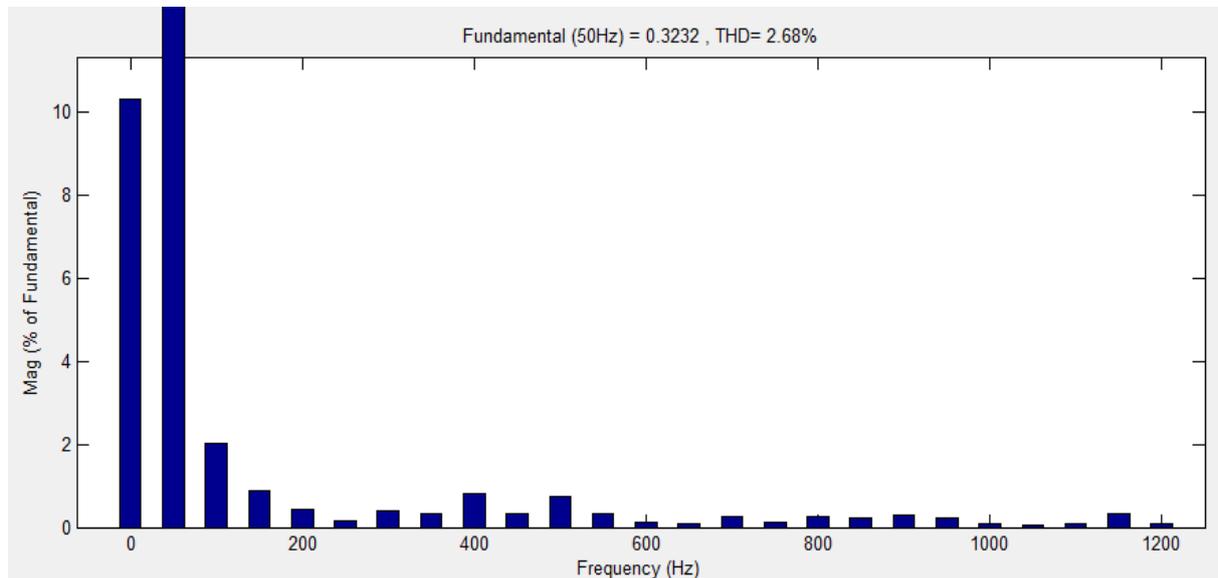


Figura 82 Análisis de corrientes mediante la transformada rápida de Fourier

IEEE 519

**Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida**

$I_{cc}/I_L$	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$\geq 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

Tabla 4 Límites de Distorsión Armónica en Corriente (IEEE 519)



Como se ve en la Figura 82 el valor de la THDi es igual a 2,68 % que no supera los valores TDD de la tabla anterior para ninguno de los casos posibles de  $I_{cc}/I_L$ . Luego la distorsión armónica que se tiene en la corriente es admisible.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- MODELOS PARA UN ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS AEROGENERADORES QUE FORMAN PARTE DE LOS PARQUES EÓLICOS DE ASTURIAS  
Proyecto Fin de Carrera nº1091001, área ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo  
Juan del Arco García
- SISTEMAS EÓLICOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
J.L. Rodríguez Amenedo  
J.C. Burgos Díaz  
S. Arnalte Gómez  
Editorial RUEDA S.L.
- ANÁLISIS Y MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL EN GENERADORES DOBLE ALIMENTADOS UTILIZADOS EN GENERADORES EÓLICOS  
David Bonjour
- ANÁLISIS DINÁMICO DE LA OPERACIÓN DE PARQUES EÓLICOS INTERCONECTADOS AL SIC  
Luis S. Vargas  
Claudia Rahmann  
Rodrigo Palma-Behnke
- DOUBLY FED INDUCTION MACHINE: OPERATING REGIONS AND DYNAMIC SIMULATION  
Joris Soens  
Karel de Brabandere  
Johan Driesen  
Ronnie Belmans
- POWER ELECTRONIC CONTROL OF AC MOTORS  
J. M. D. Murphy  
F. G. Turnbull
- MATLAB SIMULINK, SIMPOWERSYSTEMS 4.3, DISTRIBUTED RESSOURCES (DR) BLOCK LIBRARY
- ANÁLISIS DE REDES ELÉCTRICAS  
Universidade de Vigo, Laboratorio de Electrotecnia y Redes Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica
- INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA  
Universitat de València



## 8. REFERENCIAS (Bibliográficas y de Internet)

[1] Asociación Empresarial Eólica AEE

<http://www.aeeolica.es/asturias.php>

[2] Gamesa

<http://www.gamesacorp.com/files/Documentos%20PDF/Castellano/Fichas%20aerogeneradores/G90-castellano3.pdf>

[3] General Electric Energy

[http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/wind\\_turbines/en/15mw/specs.htm](http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/15mw/specs.htm)

[4] Danish Wind Industry Association

<http://www.windpower.org>

[5] Análisis y modelado del sistema de control en generadores doble alimentados utilizados en generadores eólicos; David Bonjour.

[http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/modelpot/curso2007/proy/Bonjour\\_DFIG\\_eolica.pdf](http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/modelpot/curso2007/proy/Bonjour_DFIG_eolica.pdf)

[6] Análisis dinámico de la operación de parques eólicos interconectados al SIC; Luis S. Vargas, Claudia Rahmann, Rodrigo Palma-Behnke.

[http://146.83.6.25/literatura/sistemas\\_potencia/aia-1-2006%20parques%20eolicos.pdf](http://146.83.6.25/literatura/sistemas_potencia/aia-1-2006%20parques%20eolicos.pdf)

[7] Power electronic control of AC motors

J. M. D. Murphy, F. G. Turnbull



## 9. PLANIFICACIÓN

### 9.1. Desglose de la planificación

Se llevará a cabo a continuación la planificación seguida durante el proceso de ejecución de este proyecto. Para ello en primer lugar se detallarán el conjunto ordenado de tareas que fue preciso abordar:

- A. Análisis y estudio de la información recopilada a cerca de:
  - A.1. Tipo de generador.
  - A.2. Potencia y par desarrollados por la turbina eólica.
  - A.3. Generador doblemente alimentado.
  - A.4. Control del ángulo de pala.
  
- B. Construcción de los modelos necesarios para la simulación:
  - B.1. Construcción del modelo de la red eléctrica.
  - B.2. Construcción del modelo del generador doblemente alimentado.
  
- C. Recopilación de datos:
  - C.1. Recopilación de datos generados por la simulación.
  - C.2. Análisis teórico del circuito equivalente del generador.
  - C.3. Análisis de cortocircuito.
  
- D. Preparación y redacción de los diferentes documentos de los que consta el proyecto

En la siguiente tabla, se estudiará la duración aproximada, en horas, de cada una de las tareas. Esto permitirá más adelante la realización del presupuesto del proyecto.



## 9.2. Duración de las tareas

TAREA	DESCRIPCIÓN	DURACIÓN (HORAS)
<b>A.</b>	<b>Análisis y estudio de la información recopilada a cerca de:</b>	
A.1.	Tipo de generador.	20 h
A.2.	Potencia y par desarrollado por la turbina eólica.	30 h
A.3.	Generador doblemente alimentado.	40 h
A.4.	Control del ángulo de pala.	40 h
<b>B.</b>	<b>Construcción de los modelos necesarios para la simulación:</b>	
B.1.	Construcción del modelo de la red eléctrica.	30 h
B.2.	Construcción del modelo del generador doblemente alimentado.	60 h
<b>C.</b>	<b>Recopilación de datos:</b>	
C.1.	Recopilación de datos generados por la simulación.	60 h
C.2.	Análisis teórico del circuito equivalente del generador.	60 h
C.3.	Análisis de cortocircuito.	60 h
<b>D.</b>	<b>Preparación y redacción de los diferentes documentos de los que consta el proyecto.</b>	120 h
	<b>TOTAL</b>	<b>520 h</b>

Tabla 5 Duración de las tareas



### 9.3. Calendario de ejecución de las tareas

Tarea	2011			2012				
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
<b>A.1.</b>	20							
<b>A.2.</b>	30							
<b>A.3.</b>		40						
<b>A.4.</b>			40					
<b>B.1.</b>	30							
<b>B.2.</b>			60					
<b>C.1.</b>					60			
<b>C.2.</b>					60			
<b>C.3.</b>						60		
<b>D.</b>							120	

Tabla 6 Calendario de ejecución de las tareas

# **PRESUPUESTO**

**INDICE PRESUPUESTO**

1. PRESUPUESTO .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Costes del proyecto.....	2
1.2.1. Costes de desarrollo .....	2
1.2.2. Costes de documentación .....	2
1.2.3. Costes de material .....	2



## **1. PRESUPUESTO**

### **1.1. Introducción**

El presupuesto trata de cuantificar económicamente las horas de ingeniería dedicadas a:

1. Estudio y análisis de la información necesaria para el posterior desarrollo del proyecto.
2. Desarrollo de los contenidos propios del proyecto.
3. Documentación del proyecto.

También considera los gastos de material que han tenido lugar durante el desarrollo y la documentación del proyecto

### **1.2. Costes del proyecto**

#### **1.2.1. Costes de desarrollo**

En ellos se incluyen aquellos costes resultantes de las horas de análisis y estudio, creación de los modelos para las simulaciones, realización de simulaciones, obtención de resultados, comparación de los mismos, etc. Estas horas de ingeniería se facturarán a 35,00 €/h.

#### **1.2.2. Costes de documentación**

Son aquellos derivados de la realización física de los documentos constitutivos del proyecto. Estas horas se facturarán a 22,50 €/h.

#### **1.2.3. Costes de material**

Estos costes se refieren al material de oficina que se ha empleado en la elaboración del proyecto: ordenador, impresora, licencia de Matlab y Simulink, papel, tinta para la impresión y encuadernación.



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES VALLADOLID					
PRESUPUESTO					
Nº	NUMERO DE UNIDADES	DESIGNACION DE LAS OBRAS	PRECIO DE LAS UNIDADES	IMPORTES	
				PARCIALES	TOTALES
				Euros	Euros
1	400 h	<b>Coste de desarrollo:</b> Horas de ingeniería	35,00 €/h	14.000,00 €	14.000,00 €
2	120 h	<b>Costes de documentación:</b> Horas de documentación	22,50 €/h	2.700,00 €	2.700,00 €
3		<b>Coste de material:</b>			
3.1	1	Ordenador e impresora	1.199,99 €/U	1.199,99 €	1.199,99 €
3.2	2	Papel	4,00 €/U	8,00 €	8,00 €
3.3	1	Tinta impresora	44,95 €/U	44,95 €	44,95 €
3.4	3	Encuadernaciones	6,25 €/U	18,75 €	18,75 €
3.5	1	Licencia del Matlab	978,76 €/U	978,76 €	978,76 €
<b>TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL</b>					<b>18.950,45 €</b>
<b>BENEFICIO INDUSTRIAL (6%)</b>					<b>1.137,03 €</b>
<b>GASTOS GENERALES (13%)</b>					<b>2.463,56 €</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>					<b>22.551,04 €</b>
<b>I.V.A. (18%)</b>					<b>4.059,19 €</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA</b>					<b>26.610,22 €</b>

Tabla 1 Presupuesto

Asciende el total del presupuesto de ejecución por contrata para el presente proyecto a la cantidad de:

**VEINTISÉIS MIL SEISCIENTOS DIEZ EUROS CON VEINTIDÓS CÉNTIMOS**

En Valladolid, a 5 de Junio de 2012

Fdo. Juan del Arco García  
Ingeniero Superior Industrial en Electricidad  
por la Universidad de Oviedo