



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**



**Universidad  
Zaragoza**

## **ACTUALIZACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE 30 kW EN DESUSO PARA SU NUEVA PUESTA EN SERVICIO.**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Especialidad: Electrónica Industrial**

**AUTOR: Alejandro Sánchez Pardos**

**DIRECTOR: José F. Sanz**

**CONVOCATORIA: Diciembre de 2012**

1	Introducción y objetivos .....	1
2	Antecedentes.....	5
2.1	Contexto de la energía eólica.....	5
2.1.1	Principios teóricos.....	5
2.1.2	Componentes de un aerogenerador.....	8
2.1.3	Control aerodinámico de Potencia .....	17
2.1.4	Regulación de velocidad.....	21
2.1.5	Tipos de Configuraciones eléctricas.....	22
2.1.6	Calidad de la energía suministrada a red .....	27
2.2	La antigua instalación .....	30
2.2.1	Descripción técnica .....	30
2.2.2	Componentes constituyentes del aerogenerador .....	33
2.2.3	Descripción del modo de operación .....	39
2.2.4	Piezas reutilizables .....	41
3	Descripción y análisis comparativo de las posibles soluciones.....	43
3.1	Conexión directa a la red .....	44
3.1.1	Operación a velocidad constante .....	44
3.1.2	Operación a dos velocidades.....	47
3.1.3	Métodos de arranque .....	49
3.1.4	Modelos de arrancadores estáticos .....	59
3.1.5	Compensación de energía reactiva.....	79
3.2	Regulación a velocidad variable .....	86
4	Soluciones finales adoptadas.....	90
4.1	Operación a dos velocidades.....	90
4.1.1	Descripción del programa principal .....	92
4.2	Arrancador estático .....	94
4.3	Interruptor seccionador .....	99
4.4	Contactores .....	99
4.5	Protecciones.....	103
4.5.1	Interruptores automáticos .....	103
4.5.2	Fusibles para semiconductores .....	106
4.5.3	Relés de protección.....	107
4.5.4	Descargadores de tensión .....	108

4.5.5	Interruptor diferencial contra contactos directos e indirectos .....	109
4.6	Bancos de condensadores.....	109
4.7	Cables de potencia .....	111
5	Simulación y modelado del aerogenerador.....	112
5.1	Graduador trifásico.....	113
5.1.1	Generador de pulsos.....	113
5.1.2	Círculo de potencia .....	115
5.2	Graduador trifásico con carga óhmico-inductiva .....	117
5.3	Graduador bifásico con carga óhmico-inductiva.....	124
5.4	Máquina asíncrona .....	127
5.4.1	Parámetros del generador .....	127
5.4.2	Simulación del funcionamiento como motor .....	129
5.5	Aerogenerador .....	132
5.5.1	Rotor eólico .....	134
5.5.2	Graduador trifásico .....	137
5.5.3	Simulación del aerogenerador con graduador trifásico.....	142
5.5.4	Compensación de energía reactiva.....	152
5.5.5	Simulación del aerogenerador con graduador bifásico .....	155
6	Presupuesto del circuito de potencia.....	159
7	Diagrama de flujo del programa principal.....	160
8	Planos .....	161
9	Bibliografía.....	164

## 1 Introducción y objetivos

Hoy en día las necesidades de energía eléctrica de la población mundial han aumentado considerablemente con respecto a las anteriores décadas; la dependencia de la electricidad de nuestra sociedad actual resulta obvia, ya que tanto en la industria como en el ámbito doméstico existe una tendencia hacia la automatización de procesos, lo que requiere un suministro extra de energía sumado a la también creciente demanda de energía para cubrir necesidades, hoy por hoy, básicas: Climatización, iluminación, motorización, etc.

Este es uno de los motivos que, unido a la escasez de recursos fósiles a nivel mundial y más concretamente a nivel nacional y al notable impacto medioambiental que supone la combustión de dichos recursos para la producción de energía, ha conducido a las energías renovables a experimentar un auge considerable gracias al desarrollo de las mismas por parte de las empresas de generación eléctrica. Dentro de este grupo de energías la energía eólica ha sido la que más ha proliferado y es la rama energética que se ha escogido para la realización del presente proyecto.

En efecto, tal y como se puede comprobar en multitud de estadísticas y artículos sobre energía eléctrica, la energía eólica ha destacado con respecto a otros tipos de energía en cuanto a potencia eléctrica generada y potencia instalada, lo que da constancia de la actual tendencia hacia la generación de energías limpias y la importancia que tiene analizarlas, desarrollarlas y mejorar su eficiencia de forma que puedan asegurar un buen porvenir energético.

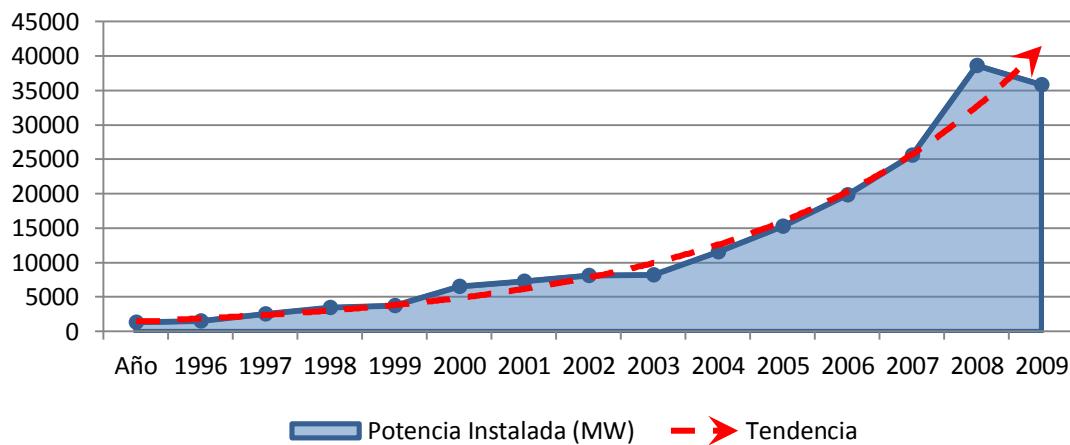


Figura 1.1. Potencia eólica instalada en España

La gran desventaja que presenta la generación de energía eléctrica por acción del viento es que este recurso es muy inestable, es decir, la velocidad del viento varía en el tiempo con una frecuencia elevada, lo que no asegura una gran producción de energía y hace difícil una predicción rigurosa de la energía producida en un futuro.

Para paliar el citado inconveniente se han desarrollado técnicas consistentes en generación a velocidad variable con convertidores de potencia en configuraciones llamadas "back to back".

Éstos permiten la generación de energía a velocidades de viento bajas aprovechando de esta manera al máximo (al menos teóricamente) el recurso eólico.

Una vez introducidos en este campo, observamos la gran cantidad de técnicas para la obtención de energía eléctrica proveniente del viento; antiguamente este recurso energético se aprovechaba extensamente para el bombeo de agua, con lo cual las técnicas desarrolladas a lo largo de la historia permiten hoy disponer de un abanico de tecnologías muy avanzadas para la obtención de energía eléctrica por mediación del viento.

La implantación de aerogeneradores en España comenzó a producirse en la década de los 80. En primera instancia eran de reducida potencia; actualmente existen generadores eólicos ya instalados de varios megavatios de potencia. Se puede decir que la energía eólica ha sido desarrollada profundamente, en consecuencia aspectos como el rendimiento de estas máquinas y el tamaño necesario para generar una potencia dada han sufrido una mejora muy notable en cuanto a hacer de esta energía una inversión rentable. Desde los inicios a esta parte se ha seguido la dinámica de agrupar una cantidad razonable de aerogeneradores dentro de una misma área, formándose así los llamados parques eólicos, los cuales tienen dos principales inconvenientes: por un lado, cada máquina produce una alteración del viento ocasionada en mayor parte por la torre que la sustenta, llamada estela, que origina en otras máquinas una variación de par absorbido y por lo tanto mayores fatigas que la máquina ha de soportar, además de producir fluctuaciones en la potencia entregada; por otro lado, la generación eléctrica en puntos alejados de los lugares de consumo conlleva un gasto elevado en lo que se refiere al transporte de energía, tanto por pérdidas por efecto Joule en las líneas de transporte como por el material necesario utilizado para tal fin.

A consecuencia de tales hechos, se está planteando en la actualidad la posibilidad de comenzar a conectar a las redes eléctricas aerogeneradores de baja y mediana potencia, pero ya no agrupados en parques, sino instalados individualmente cerca de los puntos de consumo para así evitar los elevados costes de transporte energético. A este sector de la energía eólica se le denomina Generación Distribuida (GD), y cada vez suscita mayor interés a los fabricantes de aeroturbinas y las compañías de generación eólica, ya que es una alternativa prácticamente sin investigar y la que podría abrir caminos hacia un nuevo mercado que proporcione interesantes beneficios. Este proyecto está orientado a introducirse en este mercado, lo que constituye una de las metas a alcanzar por el mismo.

La Generación Distribuida es un concepto muy amplio, pues abarca tanto instalaciones totalmente aisladas como conectadas a la red, con lo cual existen múltiples y variadas vías para llevarla a cabo. En cualquier caso, es una opción excelente para mejorar la calidad de la energía recibida por los consumidores, tener suministro eléctrico en caso de caídas de tensión en la red, abaratar los costes de la energía consumida y reducir los gastos en mantenimiento dado que es mucho menor que el requerido por generadores de alta potencia.

A todo ello se suman las ventajas comunes a las energías renovables, como son la no contaminación del medio ambiente y la obtención de energía de un recurso inagotable, en este caso del recurso eólico.

### **Objetivos**

El proyecto ante el que nos encontramos tiene como meta la reutilización de un aerogenerador instalado en la década de los 90 y que actualmente no se encuentra en servicio, con el fin último de instalarlo en áreas rurales o en el entorno industrial dentro de la geografía española. Este aerogenerador es propiedad de la empresa GPS, la cual aportará la inversión económica necesaria para la futura instalación de éste antiguo generador y que ha establecido un presupuesto limitado para la realización del proyecto.

La aeroturbina es de tres palas, con configuración de barlovento que implica un control de posición de góndola activo y con un sistema aerodinámico de control con entrada en pérdida aerodinámica. El sistema funcionaba con dos generadores de jaula de ardilla, uno de 7,5 kW de potencia nominal para velocidades de viento bajas y otro de 30kW para velocidades altas. Teniendo en cuenta las potencias nominales de los generadores vamos a trabajar en el ámbito de baja potencia, concretamente en generación distribuida.

Los generadores estaban conectados directamente a la red, de manera que funcionaban a velocidad quasi constante, siempre en el entorno de una velocidad de sincronismo que depende del número de polos del generador y de la frecuencia de la red a la cuál estaba conectado; el sistema de protecciones de la máquina estaba gestionado por lógica de relés y el control de orientación era realizado por un servosistema cuya consigna era establecida por una veleta.

La instalación del citado aerogenerador se realizará de tal manera que se consiga el mayor aprovechamiento posible de la energía cinética del viento siempre que los beneficios obtenidos a corto o medio plazo justifiquen y amorticen el gasto inicial.

### **Objeto del proyecto**

En primer lugar, cabe comentar que se dispone de antemano de los elementos estructurales del aerogenerador, tales como la torre, la góndola, el buje, las palas, la caja multiplicadora, los rodamientos, los ejes, los cojinetes, los generadores, el motor de orientación y el reductor. Puesto que se dispone de la estructura en su práctica totalidad, el control aerodinámico seguirá siendo obviamente por pérdida aerodinámica siendo inviable de todo punto plantear un control de *pitch* ; introducir un control de cambio de paso de pala es realmente complicado y elevaría el coste total demasiado, por lo que esta posibilidad no se contempla, aunque sea una opción interesante y evite muchos problemas.

Para la reutilización del aerogenerador que nos ocupa nos encontramos ante multitud de alternativas que posibiliten un funcionamiento de la máquina suficientemente eficiente. A lo largo de este proyecto se va a realizar un adecuado análisis tanto económico como funcional de estas diferentes posibilidades para así escoger la opción que mejor cumpla los objetivos.

De este modo, se llevará a cabo un análisis comparativo durante la realización de este proyecto de las ventajas e inconvenientes que conllevan las configuraciones de velocidad variable en contrapartida a las de velocidad fija y una compensación de energía reactiva mediante baterías de condensadores, frente a compensación mediante un SVC (Static Voltage Compensator), además de realizarse un estudio detallado de mercado de arrancadores estáticos que permitan una conexión a red adecuada, ya que finalmente el aerogenerador operará a velocidad constante.

Posteriormente a esta fase de proyecto, se procederá a la elección del sistema que mejor se adapte a los objetivos anteriormente comentados; finalmente se opta por una conexión directa a la red, es decir, por un funcionamiento de la máquina a velocidad casi constante; en efecto, no se trata de una operación a velocidad constante sino que se trabaja a dos velocidades de rotor eólico distintas utilizando para ello los dos generadores (uno de mayor potencia nominal que el otro) que se usaban para el mismo cometido en la configuración inicial.

Una vez determinada la configuración de control de potencia, debemos atender a la normativa de baja tensión que es de aplicación a nuestro proyecto en concreto, la que exige que no se produzcan fluctuaciones de tensión que sobrepasen un reducido rango, por lo que se deberá limitar la absorción de corriente durante el arranque de los aerogeneradores, y de esta manera reducir el consumo de la misma. Esta limitación será respetada gracias a la inclusión en el sistema de un arrancador suave o graduador, el cuál será debidamente elegido para realizar la función deseada: conectar a red un generador eólico de doble máquina. Asimismo, se determinará cómo y cuáles serán las protecciones eléctricas requeridas para una operación segura del aerogenerador

Por otro lado, desde hace varios años se han venido planteando diferentes métodos de control del factor de potencia de las máquinas de inducción con el fin de mantenerlo próximo a la unidad, para así disminuir el consumo de energía reactiva y reducir las pérdidas de potencia en las líneas de transporte. En lo que se refiere a este aspecto se ha estimado conveniente la utilización de una batería de condensadores para cada uno de los generadores las cuales se conectan a los mismos en el momento en que entran en funcionamiento.

El control del sistema supervisor de la máquina correrá a cargo de una unidad PLC que gestione las protecciones necesarias del aerogenerador además de sus estados de operación en función de las señales recibidas por los oportunos sensores, que posibilitan la transducción de magnitudes físicas a niveles de tensión. Por otra parte el control de orientación de la góndola tendrá una estructura parecida a la anterior. La programación necesaria del PLC que gestione el sistema de manera óptima y la búsqueda de sensores efectivos que proporcionen una señal adecuada y la transmisión y modulación de tal señal para obtener esa información digitalmente son objeto de otro proyecto fin de carrera ligado al que nos ocupa. No obstante el diagrama de flujo del programa que gestiona el funcionamiento normal del aerogenerador ha sido diseñado durante la realización de este proyecto en concreto.

Como colofón final del proyecto, se ha realizado una simulación del comportamiento eléctrico que presentaría el aerogenerador encontrándose en funcionamiento mediante el programa informático MATLAB.

En este programa se ha diseñado un modelado de un sistema eólico de características similares al que se pretende poner en servicio, conectado mediante arrancador suave a la red.

En resumen, todos los sistemas de control de la máquina van a ser distintos a los anteriores, exceptuando el de limitación de potencia que seguirá siendo por entrada en pérdida aerodinámica. Únicamente se conservaran algunos de los elementos mecánicos que hacen posible la generación de energía eólica, el resto deberán de ser sustituidos por causa de deterioro o desaparición, de forma que la búsqueda y la elección de estos componentes constituirán otra de las tareas a realizar de este proyecto.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Contexto de la energía eólica

Dado el gran impulso que ha experimentado la generación eólica en las últimas décadas se han desarrollado muchas y diversas tecnologías que posibilitan la obtención de energía eléctrica del viento. En este capítulo va a realizarse un pequeño resumen de todo lo relacionado con esta energía renovable, abordando los principios básicos en los que se sustenta la eólica, las partes que conforman un aerogenerador, las diferentes técnicas y métodos de control ingenieros y desarrollados para la obtención de energía eléctrica en este campo e incluso los avances tecnológicos que hoy en día se están gestando y que conducirán a la energía eólica a un método de generación más viable.

#### 2.1.1 Principios teóricos

En primer lugar cabe resaltar que la energía primigenia de la que se obtiene la energía mecánica, la cual posteriormente se transforma en energía eléctrica, es la energía cinética del viento. Para un análisis correcto del proceso de transformación de energía consideraremos un tubo de corriente, cuyas líneas de corriente atraviesan la circunferencia de barido de un aerogenerador tipo hélice de tres palas.

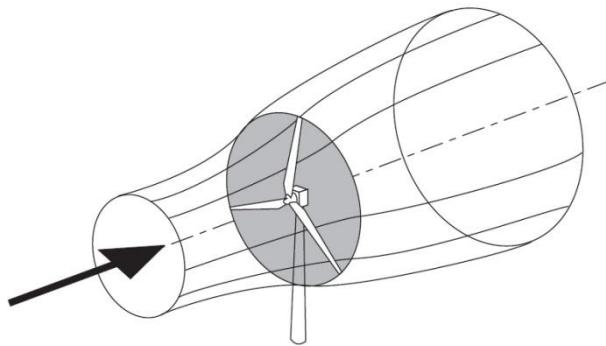


Figura 2.1. Tubo de corriente de un aerogenerador

Para el estudio de este tubo de corriente tendremos en cuenta la velocidad que atraviesa la sección de entrada del viento al tubo, la cual será denominada  $V_1$  y la velocidad de la sección de salida,  $V_2$ . La velocidad en el interior del tubo va reduciéndose a medida que el viento lo atraviesa hasta finalmente alcanzar la sección de salida donde la velocidad  $V_2$  es la inferior del tubo. Este fenómeno resulta lógico ya que la energía cinética de entrada debe ser mayor a la de salida puesto que el aerogenerador absorbe parte de la energía de entrada.

En este sentido, y de acuerdo al *teorema de Froude*, la velocidad de viento que atraviesa el aerogenerador es la media aritmética entre la velocidad incidente y la velocidad de salida:

$$V_{turbina} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

[Ec. 2.1]

Por tanto, la diferencia de energía cinética entre la entrada del tubo y la salida corresponde a la energía mecánica utilizada para poner el rotor en movimiento. La potencia mecánica absorbida puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$P_m = \left( \rho \cdot V_{turbina} \cdot \frac{\pi \cdot D^4}{4} \right) \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot V_1^2 - \frac{1}{2} \cdot V_2^2 \right)$$

[Ec. 2.2]

En la cual el primer término corresponde a la masa que atraviesa el aerogenerador por unidad de tiempo y el segundo la energía cinética perdida en el tubo de corriente por unidad de masa. Para obtener la potencia mecánica únicamente en función de la velocidad incidente nos serviremos del *coeficiente de velocidad inducida (a)*, cuya relación con las velocidades  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_{turbina}$  son las siguientes:

$$V_2 = V_1 \cdot (1 - 2a)$$

$$V_{turbina} = V_1 \cdot (1 - a)$$

[Ecs. 2.3 y 2.4]

Despejando  $V_{turbina}$  y  $V_2$  de estas ecuaciones y sustituyendo en la ecuación 1.x. se obtiene:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot [(1 - a)(1 - (1 - 2a)^2)]$$

[Ec. 2.5]

De esta manera obtenemos el llamado *coeficiente de potencia* ( $C_p$ ), un parámetro que carece de dimensión y que resulta crucial para la captación de energía mecánica. Éste corresponde al término de la ecuación entre corchetes, y por lo que se puede observar está en función de  $a$ . Derivando la ecuación anterior e igualándola a 0 se extrae el valor de  $a$  que proporciona la potencia máxima, el cual es 1/3.

Este valor de  $a$  implica un valor de  $C_p$  de aproximadamente 0,5926 y es conocido como el *límite de Betz*. Como se puede comprobar la captación energética de la energía del viento incidente no es plena, sino que solamente puede aprovecharse como máximo un 59,26 % de ésta. El factor de potencia suele ser expresado de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

[Ec. 2.6]

El valor de  $a$ , y por extensión el del coeficiente de potencia, está en función de una serie de parámetros. Éstos son los siguientes: la densidad del aire  $\rho$ , la viscosidad del aire  $\mu$ , el factor de rugosidad  $k$  (variable en función de la suciedad o elementos extraños que se sitúen en las palas), el ángulo de paso de las palas  $\beta$  para aerogeneradores que tengan control de *pitch*, es decir, un sistema de rotación de la pala entorno a su eje longitudinal, el ángulo de guiñada  $\psi$ , que consiste en el ángulo que forma el aerogenerador con la dirección del viento, la forma de la turbina y sobretodo de la velocidad angular a la que gira la turbina, de la velocidad de viento que la atraviesa y del diámetro del rotor.

Dado que la viscosidad del aire y la rugosidad de las palas no afectan apenas al coeficiente de potencia, partiendo de una forma prefijada de la turbina y suponiendo que el ángulo de guiñada es 0, se puede considerar que el factor de potencia sólo depende de la velocidad de viento, de la velocidad angular, del diámetro del rotor y de el ángulo de paso. Si tratamos con un aerogenerador que no tenga control de *pitch*, entonces obviamente el ángulo de paso es fijo por lo tanto no es una variable a tener en cuenta. En este sentido, para obtener el factor de potencia en función de menos parámetros, se define la variable *velocidad específica*  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot (D/2)}{V_1}$$

[Ec. 2.7]

Donde  $\Omega$  es la velocidad angular,  $D$  es el diámetro del rotor y  $V_1$  la velocidad de viento incidente. La velocidad específica es el cociente entre la velocidad lineal de la punta de pala y la velocidad de viento.

Por tanto, se establecen las curvas del factor de potencia en función de la velocidad específica y el ángulo de paso para poder hacer una estimación de la potencia absorbida para cada régimen de velocidad. En la figura 2.2 se muestra una curva  $C_p - \lambda$  para un ángulo de paso fijo de  $0^\circ$ .

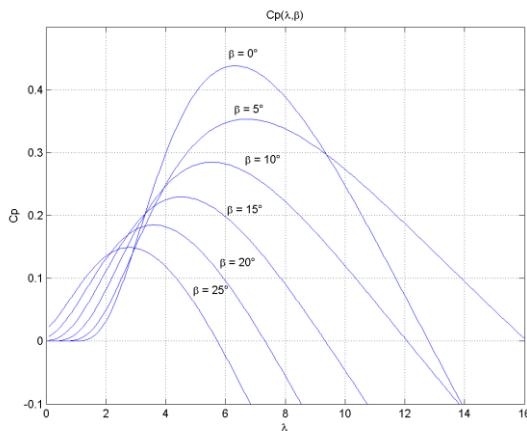


Figura 2.2. Curvas  $C_p - \lambda$  para distintos valores del ángulo de paso.

### 2.1.2 Componentes de un aerogenerador

Los principales subconjuntos en los que se puede dividir un aerogenerador son el rotor eólico, el tren de potencia, el sistema de cambio de paso de pala (en caso de llevarlo integrado), el sistema supervisor, el sistema de orientación, los sistemas de detención del rotor, el generador eléctrico y la torre. Todos ellos se describen a continuación.

#### Rotor eólico

El rotor eólico o turbina es el encargado de absorber la energía cinética del viento transformándola en energía mecánica. Está compuesto por las palas, elementos que absorben energía del viento en primera instancia y por el buje, elemento de unión entre las palas y el resto del sistema mecánico. A lo largo de la historia se han desarrollado diversos tipos de turbinas descritas a continuación:

- Turbinas de rotor de eje vertical: Son turbinas cuyo eje de rotación es perpendicular al viento. Éstas son muy poco utilizadas debido al bajo rendimiento que presentan los rotores tipo *Savonious* o el bajo par de arranque en rotores tipo *Derrieus*, lo que hace necesaria una motorización inicial. Por otro lado no es necesario un sistema de orientación y además debido a su verticalidad el sistema de transmisión y el generador eléctrico pueden situarse a ras de suelo.

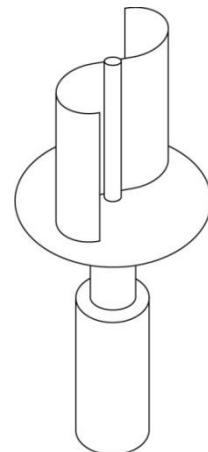
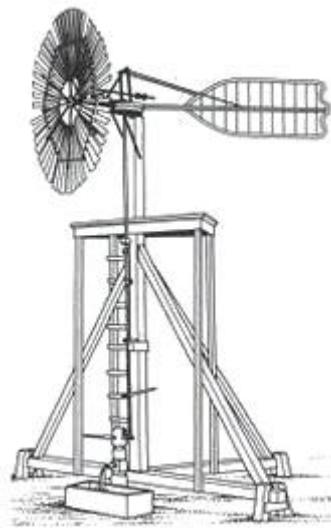


Figura 2.3. Rotor de eje vertical *Savonious*.

- Turbinas de rotor de eje horizontal: Este tipo de turbinas tiene su eje de rotación paralelo a la velocidad del viento. Hoy en día son las que se utilizan en mayor medida y casi de manera exclusiva ya que tienen unas características mucho más favorables que las anteriores para la producción de energía.

Dentro de este tipo de turbinas existe una subdivisión en dos tipos de rotores distintos:

- Rotores multipala: rotores que contienen un número de palas superior a 3, no son utilizadas para la generación eléctrica dado que su velocidad de giro es muy reducida y las máquinas eléctricas requieren velocidades considerables para generar.



*Figura 2.4. Turbina multipala tipo americano*

- Rotores de tipo hélice: estos tipos de turbinas están constituidos por 1,2 o 3 palas. Son idóneos para la generación eléctrica porque la velocidad de punta de pala toma valores altos con respecto a la velocidad de viento incidente, con lo que el elemento multiplicador de velocidad necesario para la producción eléctrica es de un tamaño y un precio asequibles. En cuanto a rotores de 1 o 2 palas, la velocidad de giro del rotor es bastante elevada lo que permite un multiplicador más económico y como las palas son pocas el coste también se ve reducido. El problema radica en que son muy inestables estructuralmente suponiendo un riesgo elevado de averías. Los rotores de 3 palas tienen una estructura mucho más estable y no oscilante, además de presentar mayor rendimiento que todas las tecnologías eólicas citadas anteriormente, razón por lo que son ampliamente utilizadas habiendo copado casi en su totalidad el mercado de energía eólica. Por último, los rotores de 4 palas ofrecen un mayor rendimiento que las de tres, aunque únicamente aumenta un 1 %, lo cual no compensa el coste de una pala más.

En los rotores de tipo hélice las palas son los elementos que absorben de manera directa la energía del viento, de manera que de una fuerza lineal, correspondiente a la del viento, generan una fuerza angular. Este fenómeno es producido gracias a la forma aerodinámica de las palas, las cuales provocan que la velocidad del viento por su parte superior sea menor a la de su parte inferior, por lo cual, de acuerdo con la *ecuación de Bernoulli*, la presión en la parte inferior es mayor y por tanto aparece una fuerza de sustentación con sentido hacia arriba. En este aspecto juega un papel importante el tipo de perfil aerodinámico de las palas, el cual es diseñado atendiendo a criterios de mejora de captación energética, disminución de cargas mecánicas sobre el rotor, así como de mejora de características de pérdida aerodinámica.

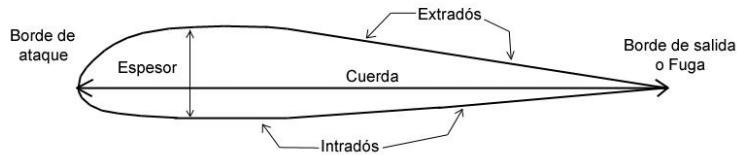


Figura 2.5. Perfil aerodinámico

Los materiales utilizados para la fabricación de palas a lo largo de toda la historia de la energía eólica han sido madera, acero, aluminio y actualmente los materiales compuestos.

Es importante una buena elección del material para diseñar estos elementos ya que en dependencia de la rigidez, el peso, la resistencia a fatiga de estos materiales y otros aspectos estructurales del material el comportamiento y la vida útil de las palas cambian.

Hoy en día los materiales compuestos son los más utilizados ya que pueden ser dotados de una geometría óptima para el comportamiento aerodinámico, además su resistencia a fatigas mecánicas es muy buena y son de peso reducido, además de suponer un coste bastante asequible. El material compuesto más comúnmente utilizado es el GRP (Glass reinforced Plastic), también denominado fibra de vidrio con resina de poliéster.

Las palas están fijadas a un elemento llamado buje, que también forma parte del rotor y está acoplado mecánicamente al tren de potencia.

### Tren de potencia

El tren de potencia o sistema de transmisión consiste en todos aquellos elementos que comunican el par mecánico generado en el rotor eólico al generador eléctrico. Debido a que normalmente la velocidad de giro de la turbina no se corresponde con la de los generadores eléctricos que permite la generación es necesaria la inclusión de una caja multiplicadora de velocidad. Este elemento se coloca entre el rotor y el generador, el rotor se acopla al denominado eje lento o eje primario y el generador al eje rápido o secundario.

Incluir un multiplicador en un aerogenerador trae consigo inconvenientes considerables ya que los esfuerzos mecánicos a los que se ve sometido lo deterioran en gran medida, son elementos pesados y además su rendimiento mecánico es relativamente bajo.

Sin embargo, el acoplamiento directo del rotor al generador implica que éste último debería ser de un número muy elevado de polos, lo que encarecería el coste del aerogenerador extremadamente.

Los componentes del sistema de transmisión deben estar diseñados de tal forma que soporten las fatigas mecánicas que les transmite la turbina y que produzcan las menores pérdidas mecánicas posibles.

Con el objeto de disminuir estas cargas soportadas por las multiplicadoras, se han diseñado sistemas de velocidad variable que disminuyan o aumenten la velocidad de giro en función de la velocidad de viento incidente. De esta manera el rotor eólico actúa como un volante de inercia que almacena parte de la energía mecánica producida por variaciones bruscas de viento en forma de energía cinética angular. Estos sistemas son posibles gracias a variadores de frecuencia electrónicos que introducen en los generadores ondas de tensión de distintas frecuencias.

Los aerogeneradores actuales suelen ir equipados con dos tipos de multiplicadores: de ejes paralelos y de tipo planetario. Los primeros disponen de ejes paralelos y los segundos de ejes helicoidales. Los multiplicadores de ejes paralelos son más económicos, sin embargo los planetarios tienen mayor robustez mecánica y pesan menos.

### **Sistema de cambio de paso de pala**

Existen aerogeneradores de tipo hélice que poseen un sistema de rotación de sus palas en torno a su eje longitudinal con la finalidad de controlar la potencia absorbida por el rotor y de frenar aerodinámicamente en caso de alarma.

Este sistema puede ser de naturaleza hidráulica o eléctrica. Los sistemas hidráulicos suelen producir el giro de las palas de manera conjunta, es decir, un solo grupo hidráulico es el encargado de hacer girar todas las palas. Sin embargo, los sistemas eléctricos por lo general poseen un motor para cada pala.

Asimismo han sido desarrollados sistemas pasivos de cambio de paso, que consisten en el giro de las palas por causas aerodinámicas, de tal manera que cuando el aerogenerador sobrepasa su velocidad de giro nominal se acciona un resorte que hace girar la punta de la pala hasta posicionarla de manera transversal a la raíz de la pala. De este modo se consigue un ángulo de paso en la punta de la pala cercano a 90° suficiente para detener el movimiento.

### **Sistema supervisor**

El objeto de este sistema consiste en la gestión automática de la operación del aerogenerador de manera segura, es decir, por un lado debe hacer funcionar al sistema debidamente en cada uno de sus estados, ya sean transitorios o permanentes, y por otro, en caso de avería o de riesgo de ésta el sistema supervisor debe detectar estas situaciones para ejecutar la orden de frenado a los mecanismos oportunos. Todas estas tareas se logran mediante la utilización de una serie de sensores de las magnitudes físicas que están relacionadas con la función aerogeneradora así como de una unidad de control, que generalmente se trata de un PLC (Programmable Logic Controller), cuyas funciones son establecer los estados de arranque, funcionamiento normal y parada en los momentos oportunos, gestionar la orientación de la

góndola y además permitir la detención del sistema cuando los sensores le transmitan las señales indicadoras de peligro o de malfuncionamiento.

### **Sistema de orientación**

Otro importante subsistema a resaltar es el de control de orientación de la góndola, con el que se trata de establecer el paralelismo del eje de rotación del rotor con la dirección de la velocidad del viento, aprovechándose así en mayor medida la energía cinética del mismo. Existen dos técnicas para conseguir este cometido:

- **Configuración a barlovento:** consiste en el control de la orientación mediante un servomecanismo que conduce a un motor eléctrico a la posición adecuada, transmitiéndose el movimiento a la góndola a través de un piñón y una corona dentada acoplada a un rodamiento, elemento que une góndola con torre. hacia la posición adecuada en un relativamente pequeño intervalo de tiempo, lo que permite al rotor estar situado por delante de la torre con respecto a la dirección de viento.
- **Configuración a sotavento:** ésta tiene un fundamento más sencillo, pues no se requiere de ningún sistema de orientación sino que ésta se produce de manera natural por acción del viento, gracias a la configuración específica de este método. Esta técnica no es utilizada apenas puesto que, al situarse el rotor detrás de la torre con respecto al viento, en el momento que la pala pasa delante de la torre se produce una reducción de par, lo que se traduce en fluctuaciones de corriente que afectan negativamente a la red eléctrica y en cargas mecánicas que dañan el rotor.



*Figura 2.6. Aerogenerador con configuración sotavento.*

### **Sistema de frenado**

El frenado de la máquina en situación de viento excesivo generalmente es llevado a cabo por un freno aerodinámico del que disponen la mayoría de aerogeneradores.

No obstante, para asegurar el bloqueo total se establece una redundancia de seguridad incluyéndose un freno mecánico, que además de detener el giro para velocidades de viento altas lo hace también para otro tipo de situaciones perjudiciales para los elementos constituyentes del sistema, como puede ser el sobrecalentamiento de los generadores. Este freno mecánico puede ser accionado hidráulica o mecánicamente y consiste en un disco acoplado al eje de baja o alta velocidad, dependiendo del criterio del diseñador, y debido a la fricción de unas zapatas que ejercen presión sobre el disco se consigue el frenado del sistema de transmisión.

### **Generador eléctrico**

Este componente es el de más relevancia en un aerogenerador; sin su existencia no sería posible la generación eléctrica.

En el mercado se pueden encontrar tanto máquinas de corriente continua como de corriente alterna. En cuanto a su comportamiento en energía eólica presentan diferencias considerables, ya que en primer lugar las máquinas de corriente continua son de mayor peso que las de alterna para una misma potencia, lo que implica que las torres tengan unas mejores características estructurales para las primeras que para las segundas, encareciéndose en consecuencia el coste. Por otro lado, al contener en su estructura un colector y escobillas las máquinas de corriente continua, se hace necesario un mantenimiento frecuente de estos elementos ya que son propensos a deteriorarse.

Además, si la potencia generada quiere entregarse a una red eléctrica, las máquinas de corriente continua necesitan un conversor de corriente continua a alterna. En vista de tales inconvenientes, no resulta de extrañar que las máquinas de continua sean relegadas por las de alterna en la mayoría de aplicaciones. Por este motivo en este texto se abordarán únicamente los generadores de corriente alterna.

Básicamente existen dos tipos de generadores de alterna: los generadores síncronos y los asíncronos o de inducción.

### **Generador síncrono**

El generador síncrono consiste en una máquina cuyos devanados de inducido se encuentran en el estator de la máquina (parte estática), al contrario que en la máquina asíncrona en la que se encuentran sobre el rotor (parte móvil).

Para inducir una corriente senoidal en estos devanados es precisa la generación de un campo magnético giratorio en el entrehierro. Esta generación es llevada a cabo por electroimanes o imanes permanentes alojados en el rotor, con lo cual giran solidarios a él. Los devanados de inducido son tres bobinados dispuestos en el estator de tal forma que queden separados 120° espaciales.

Durante una vuelta de rotor el polo norte y sur del imán o electroimán pasa frente a estos devanados una vez, induciéndose de este modo tres corrientes monofásicas en cada uno desfasadas  $120^\circ$  eléctricos, desfase correspondiente a la separación espacial de los tres devanados entre sí. La frecuencia de éstas corrientes depende de la velocidad de giro del rotor  $\Omega_s$  de la forma en que se muestra en la siguiente ecuación.

$$f = \frac{p \cdot \Omega_s}{2\pi}$$

[ec. 2.8]

Según cuál sea el elemento generador, se puede distinguir entre dos tipos de máquinas síncronas, de imanes permanentes y de rotor devanado.

Las máquinas de imanes permanentes traen consigo algunas ventajas. En primer lugar, la utilización de imanes permanentes elimina la necesidad del empleo de anillos rozantes, encargados de transmitir la corriente al inductor del rotor desde la fuente de continua en el otro tipo de máquinas síncronas y que requieren un mantenimiento periódico. Por otro lado al no haber devanado inductor se eliminan las pérdidas en el cobre que este genera, mejorándose así el rendimiento eléctrico.

Por último cabe resaltar que el paso polar es menor que en otros tipos de máquinas gracias al empleo de imanes permanentes, lo que permite construir generadores de mayor número de polos y en consecuencia no es necesaria la inclusión de una caja multiplicadora, ya que la velocidad que exige el rotor para la generación es del orden de la los rotores eólicos. La eliminación de la caja multiplicadora implica un mejor comportamiento del conjunto, tal y como se explicó anteriormente.

Las máquinas síncronas de rotor devanado poseen la ventaja de que al poder variar la corriente del inductor se puede controlar el flujo por polo y por consiguiente la f.e.m. inducida en cada fase de estator, lo que permite además de generar potencia reactiva regular el factor de potencia de la máquina. La velocidad de rotor en una máquina asíncrona se mantiene fija si se conecta de manera directa a una red eléctrica, ya que el campo magnético originado por el rotor está acoplado directamente al campo magnético giratorio originado por las corrientes de estator, con lo cuál la frecuencia de ambos campos es la misma y fijada por la red, lo cuál fuerza al rotor a girar a una velocidad fija dependiente de esa frecuencia de red. Esto supone un inconveniente añadido, puesto que se producen cargas mecánicas en el tren de potencia del aerogenerador y fluctuaciones en la potencia generada al no variar la velocidad de rotor con la velocidad del viento. Este problema se puede solucionar intercalando entre el generador y la red un variador de frecuencia, de tal manera que en función de la velocidad de viento varíe la frecuencia de la tensión en bornes del estator y por tanto la velocidad de la turbina. La inclusión de un convertidor de frecuencia obviamente supone una inversión económica mayor.

En definitiva, la utilización de un generador de imanes permanentes es mejor alternativa que la de uno de devanado rotórico ya que el paso polar del primero es mayor, por lo que el rendimiento es mejor. Por otro lado los generadores de imanes permanentes no necesitan excitación en el inductor, con lo cual no existen pérdidas de excitación.

### Generador de inducción

Los generadores de inducción, al igual que los generadores síncronos, generan un campo magnético giratorio en el entrehierro de la máquina pero sin embargo lo hacen de forma distinta.

Sus tres devanados de inducido se encuentran en el estator, separados entre sí  $120^\circ$  espaciales, los cuales se encargan de generar el campo magnético giratorio. La velocidad de este campo está en relación con la frecuencia de la red a la que se encuentra conectada la máquina y del par de polos que ésta posee:

$$\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot f}{p}$$

[Ec. 2.9]

En el funcionamiento como motor, el campo magnético induce corriente en el devanado rotórico, y en consecuencia éste experimenta una par mecánico originado por sus conductores por los que circula corriente bajo el efecto de un campo magnético variable.

Conforme la velocidad del rotor va acercándose a la velocidad del campo magnético, llamada *velocidad de sincronismo*, la variación de campo magnético que experimenta el rotor es cada vez menor, con lo cual la corriente absorbida y en consecuencia el par son decrecientes. En definitiva, cuanto mayor sea la velocidad del rotor y más próxima esté a la de sincronismo menor será el par generado. Atendiendo a este criterio, este tipo de máquina nunca puede alcanzar la velocidad de sincronismo puesto que en esa situación ficticia los devanados del rotor estarían expuestos a un campo magnético constante.

En este caso no sería inducida f.e.m. en ellos y en consecuencia cesaría el movimiento. Por esta razón a estas máquinas se les denomina máquinas asíncronas.

La máquina únicamente puede funcionar como generador en el caso de que los devanados estatóricos estén conectados a una tensión alterna, ya que en caso contrario no se establecería el campo magnético giratorio que induzca corrientes en el rotor y que éstas al lanzar el rotor por encima de la velocidad de sincronismo aumenten su magnitud de tal manera que el campo magnético desarrollado por las corrientes de rotor sea de mayor intensidad que el generado por las de estator y consecuentemente aumenten las corrientes que circulan por este último. Por tanto la máquina asíncrona es incapaz de generar la potencia reactiva necesaria para establecer el campo magnético y debe consumirla de una fuente externa. Éste es el principal inconveniente que conlleva la utilización de un generador asíncrono, puesto que las corrientes de magnetización generan pérdidas en el cobre que desmejoran el rendimiento del sistema.

Por otro lado, y a diferencia de la máquina síncrona, la velocidad de giro no es constante ya que ésta depende de la carga mecánica que experimente el rotor; si la velocidad del viento aumenta, la del rotor también lo hará, transformándose parte de la energía que proporciona el viento en energía cinética en vez de en una oscilación de par. En este sentido se puede decir que el generador asíncrono presenta mejor comportamiento que el generador síncrono. Sin embargo, la velocidad de giro del rotor en estas máquinas no está muy alejada de la de sincronismo, por lo que se podría considerar que el aerogenerador trabaja a velocidad casi constante, y por consiguiente la aparición de esfuerzos mecánicos bruscos en el sistema de transmisión sigue siendo latente, aunque siempre en menor medida que en el generador síncrono.

Además, el par nominal de una máquina asíncrona puede ser superado sin riesgo de deterioro dado que éste no corresponde al par máximo de la máquina, característica que resulta de gran importancia en la energía eólica debido a los cambios bruscos de la velocidad de viento.

Por todos estos motivos, sumados a que es una máquina muy robusta y su precio es más que asequible, el generador asíncrono es con mucho la alternativa más adoptada por los fabricantes de aerogeneradores.

### **Torre**

Debido a que la velocidad de viento es creciente con la altura, los aerogeneradores de rotor horizontal son dispuestos en la parte superior de un elemento longitudinal y colocado perpendicularmente al suelo. Este elemento resulta ser la torre.

Debido al elevado coste de estos elementos, por su altura y por la resistencia mecánica que tienen que presentar, existe un compromiso a la hora de realizar el diseño de un aerogenerador.

La mayoría de torres existentes son de acero y con una forma cónica que proporciona mejores características estructurales, pero que encarece el coste debido a la dificultad que presenta su construcción.

#### **2.1.3 Control aerodinámico de Potencia**

Como se ha comentado anteriormente, las palas de un aerogenerador experimentan una fuerza de sustentación que las empuja en dirección hacia arriba.

En el caso de que el sistema no dispusiera de ningún método de limitación de potencia, a velocidades altas de viento el rotor experimentaría un par mecánico que pudiera provocar mayores cargas mecánicas en los elementos de transmisión de las que pudieran soportar y una potencia eléctrica que superara los valores máximos admitidos por los componentes eléctricos. Además, si ocurren uno o varios fallos de fase el generador no opone par electromagnético resistente al par de entrada, por lo que a altas velocidades de viento el rotor eólico se embalaría muy rápidamente provocándose su destrucción.

En este sentido, la limitación de potencia en un aerogenerador es obligada. Para llevarla a cabo, una de las alternativas consiste en la reducción del *ángulo de ataque*  $\alpha$ . Este ángulo es el comprendido entre el perfil aerodinámico y la velocidad relativa del viento  $W$  (suma de la velocidad de viento incidente  $V$ , y  $\Omega'$  de la velocidad relativa del aire con respecto al giro del rotor, de sentido opuesto a éste). Conforme aumenta la velocidad de viento el ángulo de ataque es cada vez superior, lo que implica que la componente de la fuerza de sustentación  $L$  proyectada en el plano de giro también aumente y en consecuencia se aumenta el par mecánico.

Por otro lado, si el ángulo de ataque aumenta demasiado se produce la entrada en *pérdida aerodinámica*, es decir, se generan una serie de corrientes desprendidas en la parte superior del perfil reduciéndose la velocidad relativa en esta zona, y por consiguiente disminuyendo la fuerza de sustentación.

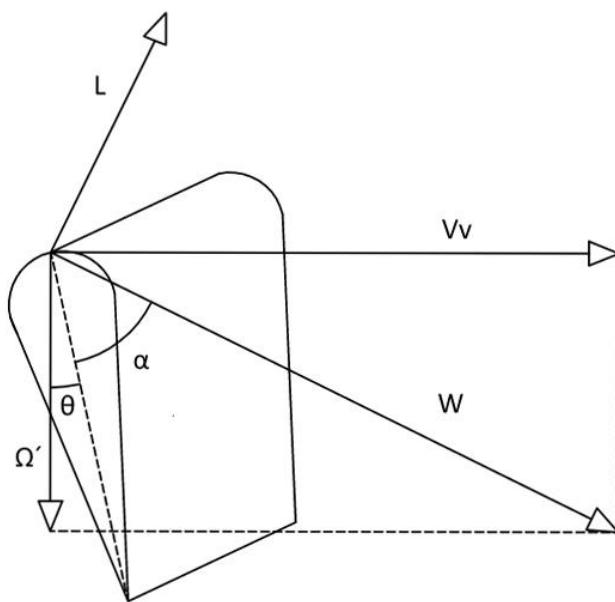


Figura 2.7. Diagrama vectorial de un perfil aerodinámico.

### Sistemas de entrada en pérdida aerodinámica (stall control)

En vista de estos acontecimientos, se implantan en los aerogeneradores sistemas pasivos de limitación de potencia o *sistemas de entrada en pérdida aerodinámica*, de tal manera que al sobrepasar la velocidad del viento la velocidad nominal de los aerogeneradores el ángulo de ataque haya aumentado de tal forma que conlleve a la aparición de flujo desprendido en el borde de salida (borde inferior en la figura 2.7), por lo que la fuerza de sustentación disminuye y en consecuencia el par y la potencia eléctrica generada. Con este sistema de limitación se asegura que una vez traspasado el umbral de la velocidad de viento nominal no se absorba potencia sin control.

Asimismo es posible conseguir la entrada en pérdida aerodinámica mediante la disminución de la velocidad de giro de la turbina ya que la velocidad relativa de giro  $\Omega'$  es proporcional a ésta y, tal y como puede observarse en la figura 2.7, la disminución de esta velocidad provoca el aumento de ángulo de ataque hasta el punto de entrar en pérdida. Esta alternativa de limitación no es muy usual dado que la limitación se produce cuando se alcanza la potencia nominal, por lo que al reducirse la velocidad de giro el par mecánico aumenta y se producen sobrecargas en el sistema.

En principio, estos sistemas limitan la potencia a la potencia nominal y aparentemente no hay riesgos de sobrecarga ni de esfuerzos mecánicos bruscos en los componentes del tren de potencia, pero esto no es totalmente cierto. Debido a la rápida variabilidad del viento, una ráfaga que ascienda la velocidad de viento por encima de la nominal puede provocar una oscilación de par importante antes de que el sistema reaccione, por lo que el aerogenerador sufre cargas transitorias.

Por otro lado hay que tener en cuenta que una vez traspasado el ángulo de ataque límite la fuerza de sustentación se reduce considerablemente, por tanto la potencia absorbida se reduce por debajo de la potencia nominal a pesar de que la velocidad de viento sea elevada.

La potencia absorbida eléctrica en función de la velocidad de viento en este tipo de sistemas se muestra en la figura 2.8.

#### **Sistemas activos de control de potencia (pitch control)**

Como se ha podido observar en la figura 2.7, en los anteriores sistemas una vez alcanzada la velocidad nominal la potencia absorbida se reduce y no permanece fija, lo que implica que para velocidades de viento elevadas el rendimiento se reduce. Por tanto, resultaría interesante implementar un sistema que mantuviera constante la potencia nominal de la máquina una vez que el viento asciende por encima de la velocidad nominal. Este es el caso de los sistemas activos de control de potencia, que además de limitar la potencia permiten un control de la velocidad de rotor en el arranque e incluso un mayor aprovechamiento de la energía eólica a cargas bajas.

El modo de operación de los sistemas de cambio de paso de pala, en función de los distintos regímenes de carga, es el siguiente: si la carga es baja, es decir, el viento incidente es reducido y menor al nominal, el ángulo de calado  $\vartheta$  se mantiene próximo a 0 para aprovechar al máximo la energía incidente.

En cambio cuando las velocidades de viento superan la nominal entonces el ángulo de calado se disminuye, por consiguiente disminuye el ángulo de ataque (figura 2.7) de tal manera que se mantenga constante la potencia absorbida. Cuanto mayor es la velocidad de viento mayor debe hacerse  $\vartheta$  para mantener constante el ángulo de ataque y no entrar profundamente en pérdida.

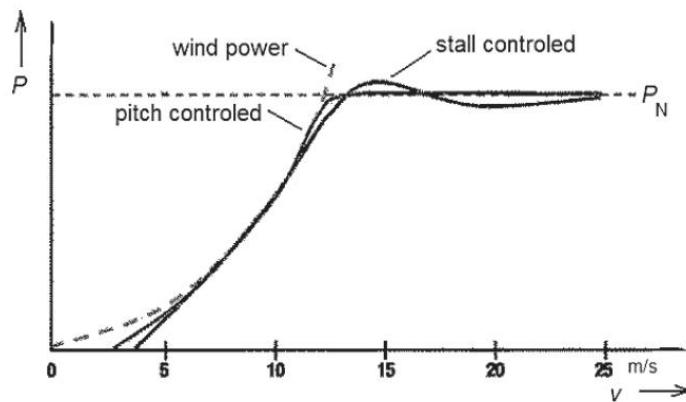


Figura 2.8. Curva potencia-velocidad de aerogeneradores con stall y pitch control.

En lo que respecta al arranque a la red de los aerogeneradores controlados por estos sistemas, éste resulta ser mucho más suave y progresivo que para los sistemas de entrada en pérdida, ya que disminuyendo paulatinamente el ángulo de calado el par generado en rotor es progresivamente creciente en vez de ser bruscamente elevado en el momento de conexión. Estos sistemas también cuentan con la ventaja de poder detener el giro del rotor en caso de vientos muy elevados (del orden de 25 m/s) aumentando en gran medida el ángulo de ataque y conduciendo a la pala hacia la llamada *posición de bandera*.

Estos sistemas no son convenientes para ser utilizados en aerogeneradores que operen a velocidad fija, dado que en el momento que se presenta una ráfaga el par absorbido se eleva considerablemente, solicitándose una reducción del ángulo de ataque en el sistema de regulación y en consecuencia un aumento del ángulo de paso. Puesto que las ráfagas de viento son habituales, las palas se encontrarán girando durante gran parte de la operación del aerogenerador, lo que conlleva problemas estructurales.

Sin embargo, no todo son ventajas en la utilización de este tipo de sistemas ya que los mecanismos necesarios para proporcionar el giro de las palas y los sistemas de regulación que gestionan éste tienen un elevado coste, además existe mayor probabilidad de que el sistema global falle al tratarse de sistemas complejos. En contrapartida, el aumento de potencia eléctrica generada para altas velocidades de viento con respecto a los sistemas de entrada en pérdida es significativa con lo cual la retribución extra obtenida compensa la inversión inicial.

Además de los sistemas de entrada en pérdida y los de cambio de paso, existen unos que combinan aspectos de ambos métodos de control de potencia. Éstos son los sistemas de *pérdida aerodinámica activa (active stall)*, cuyo funcionamiento es como sigue: Para velocidades bajas de viento se aumenta el ángulo de paso (en menor medida que en sistemas de cambio de paso totales) para producir mayor cantidad de energía a estas velocidades.

Cuando el viento alcanza su velocidad nominal, la potencia es limitada girándose la pala en el sentido inverso a la dirección del viento incidente, posicionándola tal y como se puede observar en la figura 1.9, de manera que se aumente el ángulo de ataque para hacer entrar a las palas en pérdida aerodinámica.

Si se realiza una comparativa con los anteriores controles de potencia, observamos que el control activo de pérdida aerodinámica es capaz de mantener constante la potencia generada a partir de la velocidad nominal gracias a la regulación del ángulo de ataque y en este sentido ofrece un mejor comportamiento que los controles de limitación pasivos. Por otro lado la variación del ángulo es menor para una misma limitación que en sistemas de cambio de paso normales, por lo que los mecanismos que permiten el cambio de paso son accionados con menor frecuencia y en consecuencia el deterioro por desgaste es también menor.

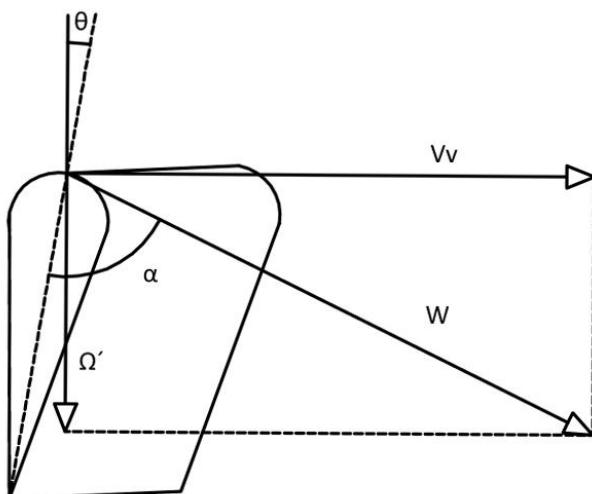


Figura 2.9. Diagrama vectorial de un perfil con control active stall.

#### 2.1.4 Regulación de velocidad

Hoy en día pueden distinguirse entre, básicamente, dos tipos de tecnologías en la energía eólica en función de la velocidad de rotor: *aerogeneradores de velocidad fija* y *aerogeneradores de velocidad variable*.

Los aerogeneradores de velocidad variable cambian la velocidad de giro de sus generadores y consecuentemente la velocidad del rotor eólico.

Como se ha comentado con anterioridad esta característica resulta ventajosa dado que el rotor se comporta como un volante de inercia capaz de almacenar energía absorbida del viento en forma de energía cinética y por lo tanto se amortiguan los esfuerzos mecánicos y la potencia eléctrica que se genera es más estable, al contrario que para sistemas de velocidad fija.

También cabe resaltar que la potencia absorbida del viento para velocidades de viento bajas es mayor que para sistemas de velocidad fija, pues la velocidad específica  $\lambda$  se establece en valores que proporcionan un mejor coeficiente de potencia para cada velocidad de viento. La complejidad de estos sistemas es mayor que la de los de velocidad variable, por lo que se puede decir que estos últimos son más robustos.

Por otro lado, la diferencia de potencia obtenida entre ambos sistemas no es muy significativa ya que la mejora se produce para cargas bajas, situaciones en las cuales el viento proporciona una potencia reducida. Además los elementos necesarios para la operación a velocidad variable son los convertidores de frecuencia electrónicos, los cuales contienen componentes de potencia cuyo precio es elevado. El uso de un convertidor de frecuencia encarece significativamente la instalación de un aerogenerador. Esta inversión inicial puede ser compensada posteriormente por el aumento de obtención de energía al utilizar estos sistemas.

El funcionamiento de los convertidores de frecuencia consiste en realizar una conversión de tensión alterna a tensión continua mediante un rectificador para posteriormente convertir esa tensión continua otra vez en tensión alterna con una frecuencia distinta de la de entrada regulada por el ángulo de disparo de los tiristores del puente.

Debido a que las ondas de salida de los inversores son rectangulares y no senoidales, este tipo de control proporciona una cantidad de armónicos considerable a la máquina, produciéndose calentamientos en los devanados importantes además de pérdidas de potencia.

Los aerogeneradores que operan a velocidad fija están directamente conectados a la red, es decir, el generador recibe la tensión de la red eléctrica sin ningún intermediario que varíe tanto la frecuencia como la amplitud de la onda.

En el capítulo 2 de este documento se realiza una comparación más exhaustiva entre estas dos alternativas.

### 2.1.5 Tipos de Configuraciones eléctricas

En dependencia del generador utilizado y de la velocidad de giro con la que se opera existen diversas configuraciones que a continuación se exponen.

#### Operación a velocidad constante

- Generador asíncrono directamente conectado a la red: Esta configuración resulta ser simple, económica y fiable.

Consiste en la conexión directa de un generador de inducción a la red, con un arrancador suave o graduador que disminuya la absorción de corriente en el momento del arranque y un compensador de energía reactiva que habitualmente suele ser una batería de condensadores.

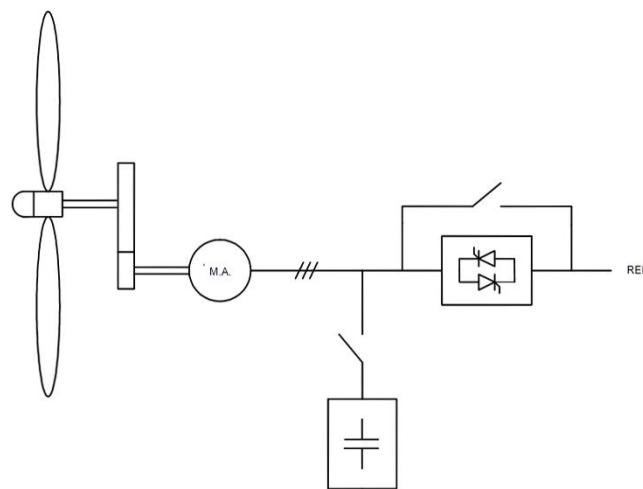


Figura 2.10. Configuración de velocidad constante con generador asíncrono.

### Operación a velocidad variable

- Generador asíncrono de rotor bobinado con resistencia rotórica variable:

Mediante la variación de la resistencia efectiva de rotor por medio de resistencias externas al generador conectadas al rotor a través de anillos rozantes en los motores de rotor bobinado, es posible cambiar la curva par velocidad de éstas máquinas, de tal manera que para velocidades elevadas de viento la resistencia rotórica equivalente sea la menor posible.

Estas configuraciones son factibles gracias a la utilización de equipos de electrónica de potencia que consisten en un puente rectificador de diodos conectado a una resistencia, a la cuál se le coloca un interruptor (transistor de potencia) en paralelo, conmutado a altas frecuencias. En dependencia de la frecuencia de conmutación la potencia disipada en el rotor varía, por lo tanto la resistencia efectiva.

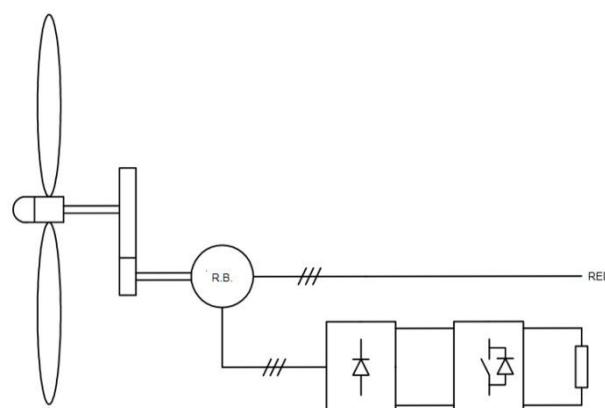


Figura 2.11. Configuración de velocidad variable con generador de rotor bobinado con resistencia rotórica variable.

- Generador asíncrono de rotor bobinado con convertidor de frecuencia: Conectando a la red el rotor de este tipo de generadores se obtiene mejor resultado que en el caso anterior, ya que la potencia de rotor en vez de ser disipada es devuelta a la red. Con este tipo de configuraciones es posible el control de la frecuencia y de la amplitud de las corrientes rotóricas, con lo que la variación de velocidad en el rotor puede ser mucho mayor que para las configuraciones de variación de resistencia rotórica. Hablamos entonces de variación de velocidad total.

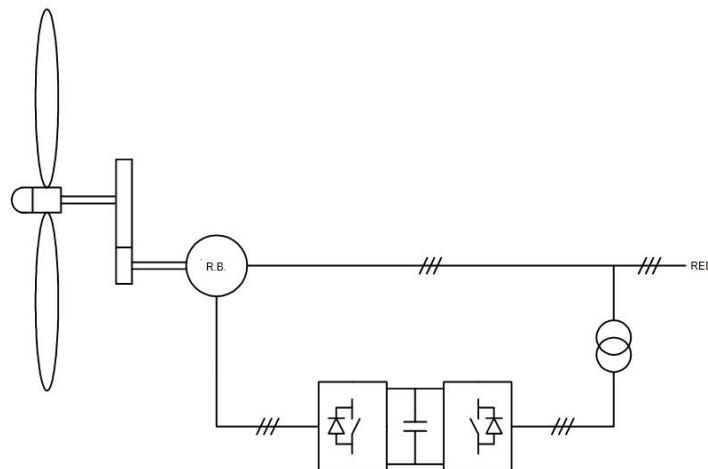


Figura 2.12. Configuración de velocidad variable, generador de rotor bobinado con regulación por “back-to-back”.

- Generador asíncrono de jaula de ardilla con convertidor de frecuencia: Otra alternativa para que el aerogenerador opere a velocidad variable consiste en incluir en el sistema un convertidor de frecuencia en serie con el estator de la máquina. Gracias a la intervención de éstos se establecen tensiones de distinta frecuencia en el estator consiguiéndose diferentes velocidades de sincronismo.

El inconveniente que presentan éstas radica en que la potencia nominal de estos equipos electrónicos de potencia debe de ser igual a la potencia nominal de la máquina, no así como ocurre cuando se regula la potencia de rotor ya que la potencia que circula por el convertidor es significativamente inferior a la que circula por estator. A mayor potencia nominal mayor cantidad de semiconductor será necesaria, lo cuál eleva el coste del equipo. Sin embargo, en el caso de producirse huecos de tensión estas configuraciones presentan mejor comportamiento que las anteriores, debido a que con la aparición de una falta de red el estator de la máquina continua alimentándose a través del condensador del convertidor, que se comporta como una fuente de continua, por lo tanto no se produce la desconexión de la máquina. Las configuraciones de generadores asíncronos doblemente alimentados, al estar directamente conectadas a la red las bobinas estatóricas, el sistema se desconecta teniendo que incluir un dispositivo adicional para evitar tal situación, como por ejemplo un *SVC (Static Vars Compensator)*.

Asimismo, estos sistemas son capaces de entregar potencia reactiva a la red, controlada por el puente del lado de red y de proporcionar la energía de magnetización para crear el campo magnético, mediante la regulación del puente del lado del generador.

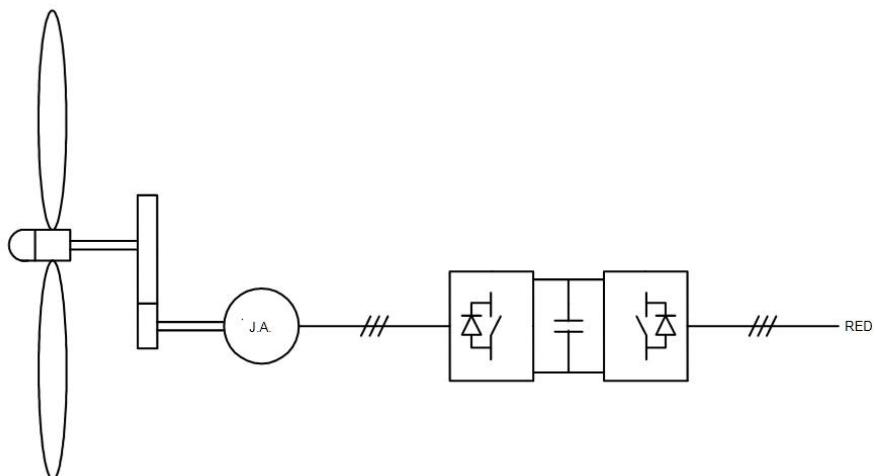


Figura 2.13. Configuración de velocidad variable, generador asíncrono de jaula de ardilla regulado con “back-to-back”.

- Generador síncrono de imanes permanentes con puente de diodos y puente de tiristores: Esta configuración se basa en un enlace de corriente continua mediante la rectificación de un puente de diodos y la inversión que produce un puente de tiristores. En algunos casos se implementa en el sistema un convertidor de continua elevador, ya que cuando se opera con velocidades de viento bajas la tensión generada es también reducida y la generación se complica. El control del par de la máquina es llevado a cabo por el puente inversor.

Para velocidades de viento por debajo de la nominal, el par de referencia del sistema de regulación permite girar al rotor a la velocidad óptima para alcanzar el factor de potencia óptimo.

Una vez alcanzada la velocidad nominal el sistema de control se encarga de generar una consigna de tal forma que conlleve a una velocidad de giro constante y se limite la potencia generada.

Un inconveniente que se presenta al utilizar este tipo de configuraciones es la aparición de armónicos de corriente debidos al puente de diodos los cuales traen consigo elevaciones de corriente bruscas que se propagan al rotor, pudiendo desmagnetizar los imanes. Para evitar esta situación es preferible utilizar una configuración “back-to-back” conectada de la misma forma que para un motor de jaula de ardilla, tal y como se aprecia en la figura 1.x(ardilla).

Asimismo esta estructura debe estar dotada de un filtro que realice la corrección del factor de potencia a la salida del inversor dado el alto contenido armónico de las tensiones y corrientes que se transfieren a la red.

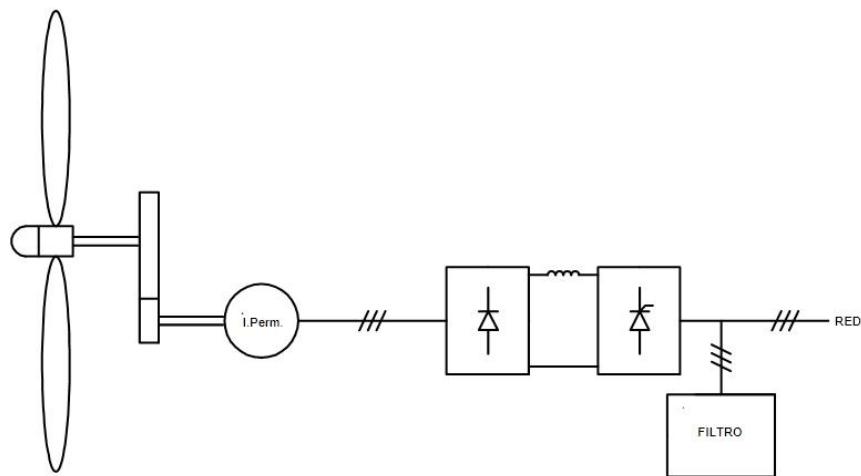


Figura 2.14. Configuración a velocidad variable, generador síncrono de imanes permanentes con puente de diodos y puente de tiristores.

- Generador síncrono de excitación independiente con dos puentes de tiristores: El control del sistema se lleva a cabo de tal manera que proporcione los valores de par y de factor de potencia deseados. El factor de potencia es regulado mediante el puente del lado del generador, mientras que el par se controla a través del puente de lado de red. La alimentación del sistema magnético se realiza a través de otro puente de tiristores, de manera que el ángulo de disparo de éstos proporcione una relación lineal entre la tensión y la frecuencia, y por consiguiente la velocidad de giro. Estos sistemas, como los anteriores, requieren de un filtro debido a la cantidad de armónicos que son transmitidos a la red.

Utilizándose una configuración “back-to-back” se consiguen mejores resultados; se puede controlar el factor de potencia en el generador y el contenido armónico de la corriente es inferior.

A pesar de las ventajas que aporta, esta configuración es cara y en algunos casos no se puede asumir su coste.

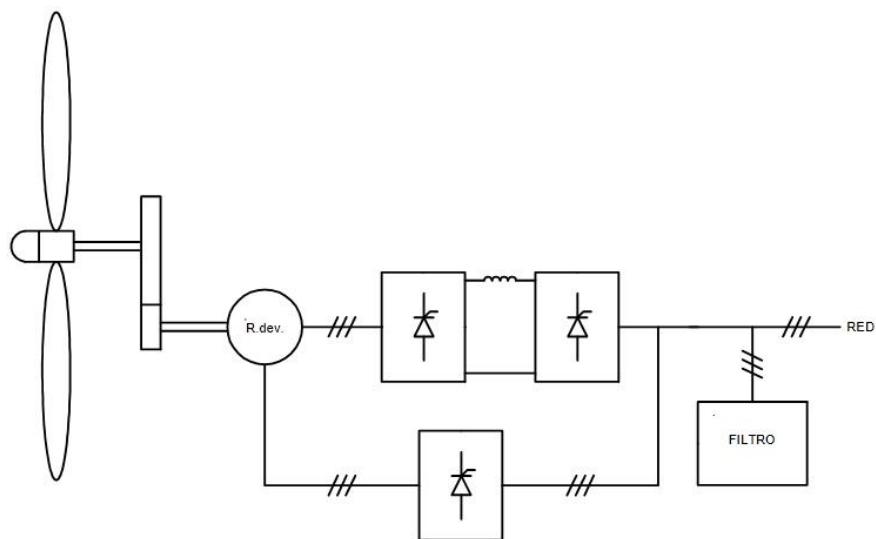


Figura 2.15. Configuración de velocidad variable, generador síncrono de rotor devanado con puentes de tiristores.

### 2.1.6 Calidad de la energía suministrada a red

Las redes eléctricas a las que se suelen conectar los aerogeneradores son redes trifásicas, cuyas ondas de tensión son senoidales con amplitud y frecuencia constante, al menos teóricamente. La conexión de cargas y de plantas generadoras perturban estas características, por lo que provocan una reducción de calidad de onda en la red a la que estén conectadas.

Los aerogeneradores forman parte de los elementos que distorsionan la red, en parte debido a las fluctuaciones de velocidad de viento que en algunas configuraciones, como se ha visto anteriormente, provocan fluctuaciones de potencia eléctrica. Además, debido a que muchos aerogeneradores suelen estar conectados a redes de distribución alejadas de las urbes, las cuales tienen una potencia de cortocircuito más bien baja, y este factor influye en la calidad de la energía suministrada.

A continuación se detallarán los distintos fenómenos que afectan a la calidad de onda de las redes eléctricas a las que están conectadas los aerogeneradores.

#### Fluctuaciones de frecuencia

En dependencia de si la generación no es suficiente para la demanda eléctrica, o la demanda es mayor a la capacidad de generación se producen variaciones en la frecuencia.

Para que no se produzcan éstas y se distorsione la frecuencia total de la red, cuya frecuencia nominal es de 50 Hz en España ya que su sistema eléctrico está conectado al europeo, se procede a la desconexión de los aerogeneradores cuando la frecuencia de la onda generada está fuera de los valores límites fijados por las normativas.

Sin embargo, para que no se produzcan muchas desconexiones de éstos, la energía generada que habitualmente es superior a la consumida se almacena en forma de energía rodante, de tal forma que para un aumento de consumo se pueda suplir la demanda. Para un mejor comportamiento de la frecuencia de la potencia generada es conveniente utilizar configuraciones de velocidad variable, ya que los equipos de electrónica de potencia permiten controlar la potencia generada incluso en caso de variaciones bruscas del viento.

### Fluctuaciones de tensión

Éstas se pueden clasificar en dos grupos: variaciones lentas de tensión y *flicker*.

Las variaciones lentas de tensión son producidas por cambios de la velocidad del viento media. Estos cambios se producen generalmente cada 10 segundos o más, por tanto las variaciones en la tensión no son transitorias. Las variaciones de tensión de este tipo están estrechamente ligadas a la potencia de cortocircuito de los puntos de conexión; cuanto mayor sea ésta menor será la variación sufrida en el punto de conexión del aerogenerador. Para baja tensión, la norma UNE 21-301-91 recomienda que la variación de tensión en el punto de conexión no supere el 10% de la tensión nominal de la instalación.

El *flicker* corresponde a una variación de tensión transitoria y reducida. Es producido en aerogeneradores por ráfagas de viento que aumentan la potencia absorbida momentáneamente y por consiguiente la corriente generada, que produce mayor caída de tensión en las líneas de transporte que en condiciones normales.

### Desequilibrio de fases

Cuando en una red eléctrica trifásica las ondas de tensión son distintas en amplitud o el desfase entre ellas difiere de  $120^\circ$  se produce un desequilibrio de fases. Si la red está desequilibrada, los convertidores de frecuencia utilizados en velocidad variable transmiten a la red armónicos de corriente de secuencia inversa, desequilibrándose aún más la tensión de red.

### Huecos de tensión

Un hueco de tensión en un punto de la red corresponde a una reducción de la tensión de una o varias fases muy acusada, recuperándose la tensión de funcionamiento transcurrido un intervalo de tiempo, que puede ser de 10 milisegundos a varios segundos.

Los huecos de tensión generalmente son producidos por fallas. Cuando en un punto de la red aguas arriba del sistema en cuestión se produce un cortocircuito la tensión comunicada al sistema es muy reducida.

Con la utilización de convertidores PWM en velocidad variable es posible evitar la desconexión de los sistemas eólicos ante la aparición de un hueco si este es de breve duración, consiguiéndose así no generarse excesivos arranques y reducir la absorción de corriente ante un hueco.

### Armónicos

Los armónicos de una onda periódica son ondas senoidales de mayor frecuencia que dicha onda periódica.

La suma de todos ellos y la componente continua es equivalente a la onda en cuestión, según el desarrollo en serie de *Fourier*. Una onda sinusoidal no tiene armónicos (excepto el fundamental) ya que ésta es igual al primer armónico o armónico fundamental. Si se aplica una onda de tensión a una carga no lineal, la onda resultante de corriente resulta ser no sinusoidal, por lo tanto esta corriente contendrá armónicos y al circular por las líneas de transporte generan caídas de tensión no sinusoidales, las cuales sumadas a la tensión de red originan una tensión resultante no sinusoidal.

En los sistemas de velocidad fija que utilizan generadores asincrónicos no se producen armónicos ni en la tensión ni en la corriente ya que este generador origina corrientes sinusoidales. Ya que este tipo de sistemas son normalmente arrancados con graduadores (arrancadores estáticos de tiristores), durante el proceso de arranque la corriente absorbida contiene armónicos ya que se “trocea” la tensión de entrada al estator de la máquina para reducir la corriente que solicita para la magnetización de sus devanados. Estos armónicos no son muy tomados en cuenta ya que el proceso del arranque es breve.

Sin embargo, los sistemas de velocidad variable que utilizan convertidores PWM generan armónicos durante todo el tiempo de operación ya que éstos se encuentran en funcionamiento continuo para regular la potencia activa y reactiva en la máquina en el estado de operación normal del aerogenerador y no sólo durante el proceso de arranque. Los armónicos de corriente de amplitud considerable de corriente generados por estos convertidores son de frecuencia igual a la de conmutación de los interruptores y a múltiplos de ésta. Si la frecuencia de conmutación es alta, los armónicos de mayor amplitud son de una amplitud reducida, con lo cuál se disminuye la inyección de armónicos a la red. Los convertidores que emplean como interruptores *IGBTs* permiten utilizar frecuencias de conmutación altas. El problema de utilizar frecuencias de conmutación altas está en el aumento de consumo que estas suponen con respecto a utilizar frecuencias bajas, por lo tanto existe un compromiso entre calidad de onda y pérdidas de potencia.

Un parámetro que permite hacerse una idea del contenido armónico de una onda con respecto al armónico fundamental es el *THD* (*Total Harmonic Distortion*), cuya expresión es la que se muestra en la ecuación 2.10.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{k \neq 1}^{\infty} V_n^2}$$

[Ec. 2.10]

## 2.2 La antigua instalación

Como anteriormente ha sido comentado, el aerogenerador que se pretende poner en funcionamiento ya estuvo instalado en la década de los 90. Unos años más tarde se prescindió de su servicio por causas que desconocemos. A pesar de encontrarse fuera de servicio, la gran mayoría de piezas que constituyen el aerogenerador están en perfectas condiciones para su reutilización ya que se han realizado ensayos para comprobar su resistencia mecánica y rigidez que así lo demuestran. A lo largo del presente capítulo se realizará una descripción de la composición de éste sistema aerogenerador, de su sistema supervisor y del funcionamiento del sistema de generación, posteriormente se detallará de qué componentes de la máquina se disponen y además están en buen estado.

### 2.2.1 Descripción técnica

En primer lugar hablaremos del método de captación energética del sistema. Para un mayor aprovechamiento del recurso eólico, tal y como se ha explicado en el anterior capítulo, el aerogenerador operaba con dos generadores, uno para cargas bajas y otro para altas, es decir, el control del aerogenerador era a velocidad constante, más concretamente a dos velocidades. Los generadores son asíncronos de jaula de ardilla cuyas potencias nominales son 30 kW y 7,5 kW.

El aerogenerador es de eje horizontal, rotor a barlovento, con 3 palas de 5 m de longitud, paso fijo y dotadas de frenos aerodinámicos, que junto a un buje conforman el rotor eólico. El rotor eólico transmite la potencia mecánica, mediante un eje guiado por dos rodamientos que facilitaban el giro del mismo, a una caja multiplicadora de ejes paralelos de relación 1:20,26. Ésta permitía aumentar la velocidad angular de un eje que va unido al rotor del generador de 30 kW (el cual será denominado G2 de aquí en adelante) para de este modo alcanzar y superar la velocidad de sincronismo de la máquina y permitir la generación. En el eje que une la multiplicadora con el generador, el cual llamaremos eje principal, se encontraba acoplado un electrofreno que en caso de alarma actuaba para detener el movimiento del rotor e incluso podía ser accionado manualmente para tareas de mantenimiento.

El generador de 7,5 kW (G1 de aquí en adelante) estaba acoplado mecánicamente al eje del rotor de G2 a través de correas de transmisión, lográndose de esta manera una relación de multiplicación de 1:21,4 entre el eje de la turbina y el de G1. Con mayor relación de multiplicación se consigue que para velocidades más reducidas de rotor eólico se supere la velocidad de sincronismo en el generador, obteniéndose así una captación de energía mayor al reducirse la velocidad específica  $\lambda$  para cargas bajas (velocidades de viento reducidas). Finalmente ambos generadores estaban directamente conectados a una red eléctrica de baja tensión de 380 v, y eran comutados por sendos contactores.

En lo que se refiere a la aparenta necesaria para el control del sistema se contaba con un anemómetro que detectaba la velocidad de viento, una veleta que capta la dirección del viento, termopares para controlar la temperatura de los distintos elementos, un sensor de vibración en la góndola, transformadores de intensidad para la supervisión de la corriente y una dinamo tacométrica para sensar la velocidad angular del eje principal (eje de G2).

De la misma forma que la gran mayoría de aerogeneradores el presente disponía de un sistema de orientación que conduce a la góndola a una posición en la que el plano que contiene las palas sea perpendicular a la dirección del viento. Obviamente nunca se alcanza la perpendicularidad como tal ya que el viento es muy variable en cuanto a dirección y a velocidad y el sistema no genera una respuesta instantánea, pero el ángulo del plano citado con la dirección del viento que se logra normalmente es cercano a 90°.

El sistema de orientación antiguamente implementado consistía en un *motor-reductor*, que como su propio nombre indica estaba compuesto de un motor colocado transversalmente a la góndola y alojado en la misma y un reductor de velocidad. El método de control de este motor era el llamado *servomecanismo*, el cual mediante un regulador y realimentación dirige a la góndola a la posición indicada por la consigna del bucle de regulación, que resulta ser la dirección del viento que detecta la veleta. Además de este control automático era posible gobernar la orientación de la góndola manualmente mediante dos pulsadores, uno que permitía el giro del motor a derechas y el otro a izquierdas, de manera que cuando se alcanzaba la posición deseada se dejaba de presionar el pulsador correspondiente para detener el motor.

A pesar de que contar con un sistema de orientación a la hora de diseñar un aerogenerador aporta más beneficios que inconvenientes y por ello se implanta en casi todos ellos, también conlleva alguna desventaja, como lo es retorcimiento de los cables de potencia y de control que conectan los componentes de la góndola con los de los armarios inferiores, fenómeno que se produce cuando la góndola da varias vueltas en un solo sentido. Para evitar este inconveniente el PEUI-10 disponía de un detector de vueltas que experimentaba la góndola, y cuando se detectaban más de 5 vueltas en un mismo sentido se enviaba una señal al sistema de control para que el motor de orientación girara en el sentido contrario hasta alcanzar la posición original.

Por último cabe comentar que se disponía de unas reactancias para limitar la corriente durante el arranque.

Una vez citados los elementos que constituyen la máquina, el siguiente paso es explicar brevemente el funcionamiento del sistema frente a las distintas variables que le afectan, para más adelante abordarlo con detalle.

En primer lugar, para que se produjera el arranque, y acto seguido comenzara el proceso de generación, el anemómetro debía detectar una velocidad de viento superior a 4 m/s y que se mantuviera por encima de ese umbral durante al menos 10 minutos.

Si se reunían estas condiciones se procedía a orientar adecuadamente la góndola y a arrancar el generador G1 mediante motorización. Para el arranque se intercalaban en serie las reactancias de arranque que reducían la corriente absorbida por la máquina durante este proceso.

Transcurrido un cierto tiempo tras la conexión del aerogenerador a la red, las reactancias se desconectaban y se conectaba el generador directamente a la red. En el momento en que aumentaba la velocidad de viento de tal manera que generaba una corriente mayor a la nominal del generador G1, situación que se produce para vientos de alrededor de 7 m/s, se realizaba el cambio al generador G2, conectándose a la red también mediante reactancias para evitar picos de corriente. En el caso de producirse una reducción de viento por debajo de 7 m/s, volvía a conectarse G1 a la red, también mediante reactancias. Si la reducción era más drástica y la velocidad de viento resultaba inferior a 4 m/s durante 20 segundos, se producía la desconexión del sistema.

En el caso de alarma el sistema de control manda la orden al electrofreno de actuar. Estas alarmas son:

- Velocidad de viento excesiva.
- Velocidad angular excesiva del eje principal.
- Temperatura en algún componente mayor a la que pueda soportar, vibraciones excesivas.
- Vueltas de la góndola en un mismo sentido mayores a las permitidas para un buen mantenimiento de los cables eléctricos.
- Intensidad mayor a la nominal durante un tiempo considerable.
- Pérdida de una o varias fases de tensión.
- Fallo en el sistema de orientación.

Cuando se presentaba una elevación en la velocidad de viento excesiva actuaba el freno aerodinámico de las palas en primer lugar y posteriormente se accionaba el electrofreno. Asimismo podía efectuarse una parada manual de emergencia mediante un pulsador de emergencia que se situaba en el panel de control, activándose el electrofreno una vez pulsado éste. En el caso de fallo de los frenos anteriores es posible detener la máquina desorientando manualmente la góndola con los pulsadores dispuestos a tal efecto.

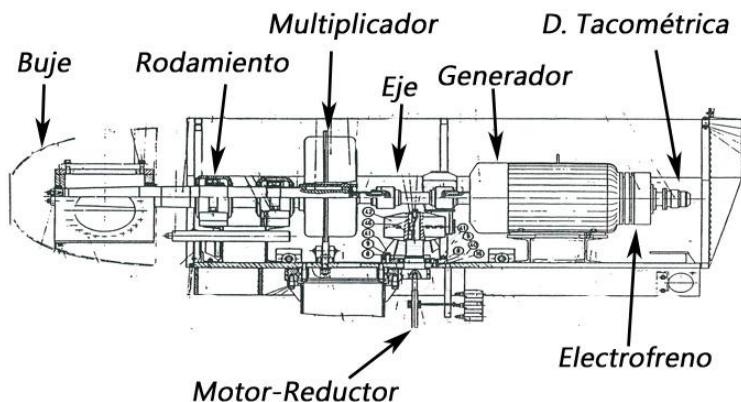


Figura 2.16. Disposición espacial de los elementos de la góndola del PEUI-10.

## 2.2.2 Componentes constituyentes del aerogenerador

A continuación se citarán y describirán todos los componentes en los que se dividía el aerogenerador, agrupados con arreglo a su función o su naturaleza.

### Componentes mecánicos

- Góndola (chasis): La góndola está constituida por un chasis de acero galvanizado y una cubierta abatible de chapa galvanizada. El chasis está formado por una parte fija y otra móvil, la cuál es una capota que se puede abrir mediante ruedas y guías deslizantes que permiten su abatimiento hacia atrás y de esta manera poder visualizar y acceder a los elementos que alberga en su interior. Cuando la capota esta abatida se mantiene en esa posición gracias a su propio peso. En cada uno de los laterales de la góndola estaba colocado un balcón de mantenimiento. La góndola y la torre estaban acopladas mediante un rodamiento y la corona dentada que forma parte del reductor del sistema de orientación.
- Eje de baja velocidad: Este eje se mantenía firme y estable por efecto de dos soportes de rodamientos de rodillos oscilantes. Estos rodamientos absorben las cargas mecánicas y de esta forma no son transmitidas al resto de elementos. El primero de ellos soporta algunos esfuerzos radiales, mientras que el segundo soporta el resto de esfuerzos radiales y además los axiales.
- Multiplicador de velocidad: Multiplicador de ejes paralelos y engranajes rectos. Su potencia nominal es de 38 KW y tiene una relación de multiplicación de 1:20,26.
- Correa de transmisión: Sistema de transmisión consistente en dos ruedas y una cinta que acopla G1 con el eje de G2. La relación de multiplicación del conjunto multiplicador-correa es de 1:21,4.

- Eje-piñón de ataque: Éste componente es el encargado de transmitir el giro del motor del sistema de orientación a la corona dentada que provoca el giro de la góndola.
- Mecanismo de detección de vueltas de cables: Consiste en una barra roscada que hace las veces de husillo convirtiendo el movimiento angular del giro de la góndola en movimiento lineal. Una vez que la góndola ha dado 5 vueltas en un mismo sentido el husillo alcanza unos topes de fin de carrera que provocan una emergencia, actuando de este modo el electrofreno y acto seguido se hace retornar a la góndola hasta alcanzar la posición inicial.
- Seguro mecánico: En el caso de ser necesaria la reparación, la sustitución o el desbloqueo del electrofreno, un enclavamiento mecánico aseguraba el bloqueo permanente del rotor eólico y en consecuencia de todo el sistema, evitándose así posibles accidentes.
- Rodamiento-corona dentada: Este conjunto de elementos permiten el cambio de posición de la góndola con respecto a la torre, además de ser el componente de unión entre ambas partes. El rodamiento facilita el giro y absorbe esfuerzos mecánicos.
- Tacómetro centrífugo: Este dispositivo consiste en un detector de velocidad mecánico que dependiendo de cuál sea la velocidad de giro cambia la posición de una pequeña barra metálica, la cuál en este caso cerraba un contacto eléctrico que permitía la alimentación de un relé, provocándose en consecuencia el frenado de la máquina.
- Palas: Las palas de las que el sistema estaba provisto son de paso fijo de  $0^\circ$ , es decir, el paso de la pala se mantiene constante para cualquier régimen de viento. Las palas son del tipo NACA y sus características están agrupadas en la siguiente tabla:

Material	G.R.P. *
Diámetro de rotor	10.8 m
Longitud de una pala	5 m
Peso de una pala	100 kg
Inercia de una pala	1350 kg.m <sup>2</sup>
Cuerda en la punta	360 mm
Cuerda en la raíz	780 mm
Cp máximo	0.475
$\lambda$ óptima	5,7
Potencia del generador Recomendada	15-30 KW
Velocidad nominal de rotor	75 r.p.m.
Velocidad de activación del aerofreno	83 r.p.m.

Tabla 2.1. Características de la pala del PEUI-10.

\*El G.R.P. (Glass Reinforced Plastic) es un material compuesto formado por una matriz de plástico reforzado con fibras de vidrio.

- Buje: Compuesto de acero. Presenta 3 agujeros circulares en los que se albergan las palas.
- Torre: Constituida por dos tramos que consisten en dos tubos de acero. Está provista de escaleras laterales para acceder a los balcones de mantenimiento. La torre estaba firmemente fijada al suelo mediante anclajes a las fundaciones de hormigón.

#### Componentes eléctricos y electrónicos

- Generador 30 kW: El generador de mayor potencia del sistema es una máquina asíncrona de jaula de ardilla de una potencia nominal de 30 kW, cuyas características principales son recogidas en la siguiente tabla:

Tensión nominal de línea	380 V
Frecuencia de red	50 Hz
Pares de polos (p)	2
Velocidad de sincronismo	1500 r.p.m.
Velocidad de viento a la potencia nominal	12 m/s
Velocidad nominal	1550 r.p.m.
Potencia máxima	33 kW
Rendimiento nominal	87 %
Factor de potencia nominal	0,87

Tabla 2.2. Características del generador de 30 kW del PEUI-10.

- Generador 7,5 KW: El generador de baja potencia del sistema también es asíncrono de jaula de ardilla y su potencia nominal es de 7,5 kW. Sus principales características son expuestas en la siguiente tabla:

Tensión nominal de línea	380 v
Frecuencia de red	50 hz
Pares de polos (p)	2
Velocidad de sincronismo	1500 r.p.m.
Velocidad de viento a la potencia nominal	6,5 m/s
Velocidad nominal	1530 r.p.m.
Potencia máxima	10 KW
Rendimiento nominal	87 %
Factor de potencia nominal	0,85

Tabla 2.3. Características del generador de 7,5 kW del PEUI-10.

- Electrofreno: El freno mecánico de emergencia accionado eléctricamente actuaba en el caso de producirse una anomalía de las anteriormente comentadas en el sistema. Éste es un freno electromagnético por reacción de resortes, los cuales, al interrumpir la alimentación de la bobina y desmagnetizarse su núcleo quedan liberados y se expanden, produciendo una presión sobre los discos de fricción de freno lo bastante intensa como para detener el giro de la máquina.

El electrofreno consume 48 W de potencia en estado de espera; la bobina de control se alimenta a 24 v con lo cuál la corriente necesaria para atraer los resortes es de 2 A.

- Servomecanismo: El sistema de orientación estaba formado por un motor asincrónico de jaula de ardilla y de un regulador que conformaban un servomecanismo.
- Contactores: Los elementos de conmutación de corriente utilizados eran contactores, ya fuera para realizar la conexión de los generadores y de las reactancias de arranque o para realizar el cambio de conexión que permitiese la inversión del giro del motor de orientación. Éstos son contactores de la firma *Telemecanique*. Los contactores que conmutan a los generadores son del modelo LC1-D803, para motores de jaula de ardilla, categoría AC3. Su frecuencia máxima de maniobras es de 750 con un factor de utilización de 0,85, pueden ser utilizados para 10 millones de maniobras sin deteriorarse y tienen un poder de corte de 1100 A.
- Fusibles: El aerogenerador estaba protegido frente a cortocircuitos y sobrecargas con 3 fusibles, uno por fase, del tipo gG de intensidad nominal 100 A.
- Interruptor-seccionador: Se disponía de un interruptor-seccionador que aislabía totalmente el aerogenerador de la red y con el que se podía interrumpir la corriente que circulaba por el mismo como última alternativa en caso de emergencia.
- Lógica de relés: El sistema supervisor del aerogenerador corría a cargo de un sistema de lógica cableada que consistía en un control por umbral, es decir, si cierta señal eléctrica superaba un valor previamente establecido se activaba un relé que provocaba una acción determinada, o activaba un temporizador para que concluido el tiempo para el que estaba programado se produjera una acción.
- Sensores: El aerogenerador PEUI-10 disponía de una serie de sensores de las magnitudes físicas que afectan al funcionamiento y caracterizan al sistema generador. A continuación se enumeran todos los sensores que estaban implementados:
  - Un anemómetro de cazoletas, que proporciona en su salida pulsos de tensión de frecuencia variable y dependiente de la velocidad del viento.
  - Una veleta potenciométrica.

- Termopares encargados de detectar la temperatura de los 6 bobinados estáticos de los generadores y del motor de orientación, que provocan la actuación de los relés térmicos cuando se supere la temperatura de 85°.
- Un generador tacométrico de corriente continua acoplado en el eje del generador G2.
- Un sensor de vibraciones consistente en un acelerómetro potenciométrico, colocado en la parte superior de la góndola.
- Tres transformadores de intensidad, uno por fase, para el control de la misma.
- Un transformador de tensión utilizado a modo de detector de tensión, para detener el funcionamiento en caso de ausencia de fase.
- Placas de circuito impreso: El PEUI-10 contenía dos tarjetas de circuito impreso. Una de ellas se encargaba de la transducción del anemómetro, conteniendo una fuente de alimentación, un conformador de pulsos y un conversor frecuencia-tensión, en cuya entrada recibía los pulsos generados por el anemómetro y en su salida presentaba una tensión continua entre 0 v y 5v, valores correspondientes a 0 m/s y 30 m/s respectivamente. La otra contenía los relés de actuación del sistema de anemometría, los cuales eran tres, encargados de actuar en caso de viento excesivo, viento suficiente y viento bajo.
- Fuente de alimentación: La función de este elemento era alimentar en tensión continua el circuito de control y el electrofreno. Su entrada estaba protegida por un interruptor magnetotérmico. La tensión en su entrada era de 220 V en ca y su salida de 24 V en cc con un suministro máximo de 5 A.

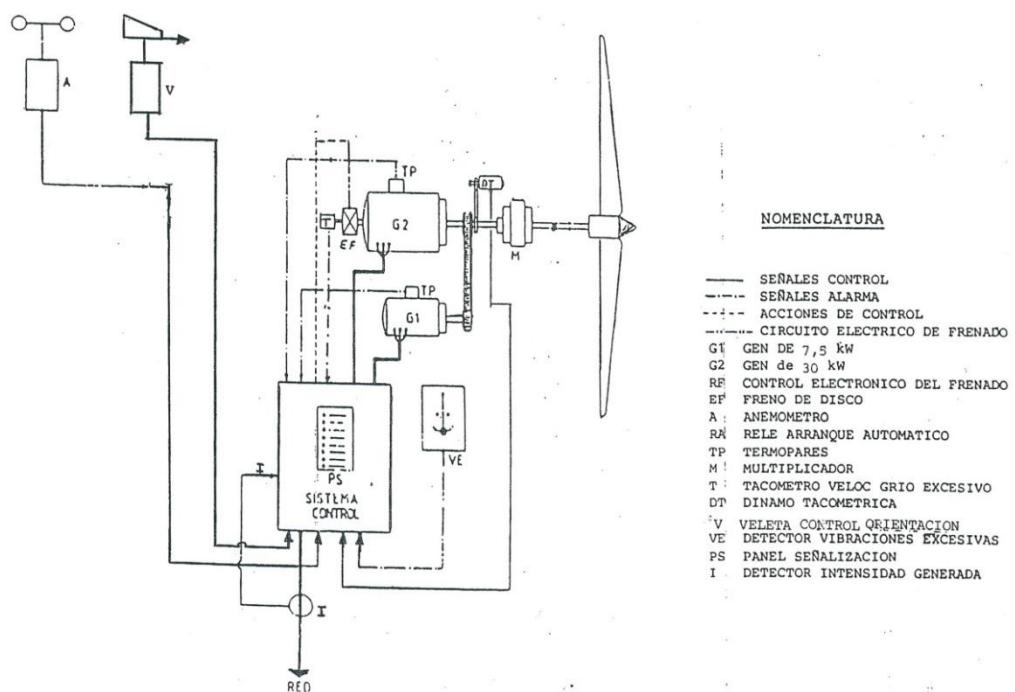


Figura 2.17. Diagrama de bloques del PEUI-10.

## Interfaz

- Panel de mando: El panel de control manual, tal y como puede observarse en la figura 2.18, estaba compuesto por un conmutador de tres posiciones, tres conmutadores de dos posiciones, un LED rojo de fallo de orientación y un indicador de velocidad de viento. El conmutador de tres posiciones servía para conducir a la máquina a tres estados diferentes: “paro”, “manual” y “automático”. En el estado de paro el aerogenerador se encontraba en reposo, con el freno accionado bloqueando el rotor y con el sistema de orientación deshabilitado, con el objeto de que se pudieran realizar operaciones de mantenimiento o de reparación de manera segura. En el estado manual el rotor eólico se encontraba bloqueado y se permitía el giro de la góndola por acción manual mediante dos de los conmutadores de dos posiciones que a tal efecto se disponían, uno para girar el motor a derechas y el otro a izquierdas. El giro manual era principalmente utilizado para desenrollar los cables cuando fallaba el sistema de detección de vueltas de góndola excesivas. En el estado automático el aerogenerador se orientaba mediante el servomecanismo de orientación, comandado por la veleta. En este último estado quedaban anulados los interruptores de giro a derechas y a izquierdas.

El último conmutador provocaba una alarma en una de sus posiciones, deteniéndose el giro del aerogenerador mediante el electrofreno, desconectándose los generadores de red e inhabilitando la orientación. Para volver a poner en funcionamiento el sistema bastaba con cambiar de posición el conmutador para producir el arranque. En el caso de la aparición de una alarma que detuviera el aerogenerador automáticamente, para volver a establecer la generación era necesario colocar el conmutador de alarma en posición de alarma para después llevarlo a la posición de funcionamiento normal.

- Señalización luminosa: Eran señalizados visualmente mediante LEDs los siguientes estados o eventos: velocidad de viento ascendente y descendente, intensidad superior a la nominal, fallo de fase, temperatura elevada en G1 y G2, vibraciones excesivas, fallo en el arranque, operación de G1 y operación de G2, además de ser señalizado el fallo del sistema de orientación en el panel de control.

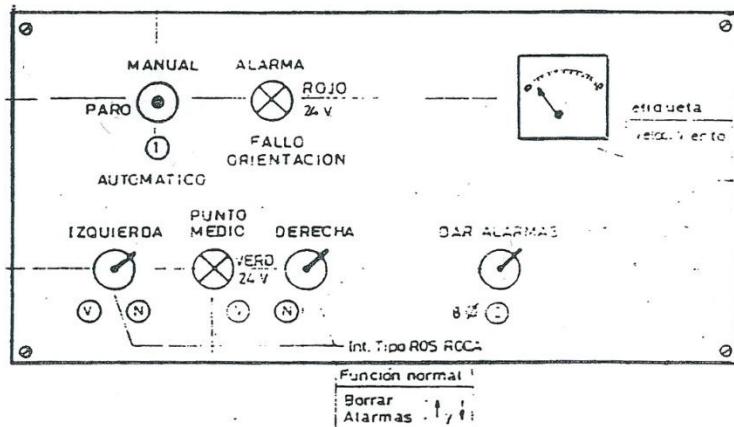


Figura 2.18. Panel de mando del PEUI-10

### 2.2.3 Descripción del modo de operación

En este apartado se va a explicar cómo actuaba el sistema en condiciones de normalidad y bajo situaciones anómalas.

#### Modo de operación normal

El arranque del aerogenerador se producía en el momento en que el anemómetro detectaba una velocidad de viento superior a 4 m/s, en ese momento el relé de "viento suficiente" activaba un temporizador que abría un contacto transcurridos 10 minutos, el cual se detenía y se reiniciaba en el momento en que el viento descendía por debajo de 4 m/s durante ese tiempo. Este contacto permitía la alimentación de un contactor auxiliar que a su vez alimentaba al contactor que acoplaba el generador G1 acoplado en serie con las reactancias de arranque a la red, activándose a su vez un temporizador que alcanzado el tiempo establecido abría la alimentación del anterior contactor, de forma que quedaba el generador desconectado de red. En el momento en que la velocidad de giro del rotor, impulsada por la acción del viento, alcanzaba un cierto valor, se volvía a conectar el contactor de las reactancias para transcurrido el tiempo del temporizador correspondiente al arranque se desconectara este contactor y se acoplara directamente a la red el generador G1 mediante el contactor correspondiente.

Alcanzada una velocidad angular determinada se conectaba a red el generador G2, siguiéndose el mismo proceso que para la conexión de G1, habiéndose separado de la red éste último previamente.

En el caso de estar en funcionamiento el generador G2 y producirse una reducción de la velocidad de viento que hiciera disminuir la velocidad angular del eje de G2 a una velocidad cercana a la de sincronismo se activaba un temporizador programado a 20 segundos que se detenía y se reiniciaba si la velocidad de G2 superaba el valor de conmutación.

En caso contrario transcurrido ese intervalo se realizaba el acoplamiento de G1 a través de las reactancias de arranque.

Si encontrándose el sistema en ese estado la velocidad de viento se hacía menor a 4 m/s, G1 y el sistema de orientación se desconectaban para detener la generación.

#### Modo de operación en situación de emergencia

En situación de emergencia el sistema de control ejecutaba la orden de parada y tomaba las medidas oportunas. A continuación se describirán todas las posibles causas de detención o de permanencia en reposo del aerogenerador.

- Velocidad de viento extrema: El sistema se bloqueaba para vientos superiores a 25 m/s. Este bloqueo permanecía durante 10 minutos, si transcurridos estos la velocidad se había reducido por debajo de ese umbral se reanudaba la acción generadora. En caso contrario el sistema continuaba en su estado de bloqueo. El sistema se rearma cuando se detectan 22 m/s de velocidad.
- Velocidad de giro extrema: Un tacómetro centrífugo, a la velocidad de 1800 r.p.m., producía el cierre de un contacto para permitir la circulación de corriente a través de la bobina de mando de un relé, cuyo contacto principal abría para interrumpir la corriente que absorbía el electrofreno en estado de espera. Esta emergencia era también cubierta por la dinamo tacométrica con un sistema de actuación parecido, para originar un sistema de protección redundante que asegurara el frenado.
- Velocidad de giro mínima: Podía darse el caso de que el eje estuviera bloqueado mecánicamente por alguna razón y aunque se ejecute la orden de puesta en funcionamiento no producirse giro alguno del rotor. Para evitar la conexión eléctrica en esta situación y encontrarse el generador consumiendo potencia sin provocar el giro del rotor no se realizaba el arranque si no se detectaba en el instante que finalizaba el conteo de un temporizador una velocidad de giro en el eje mínima. Esta situación podía ser identificada mediante la señalización luminosa de “fallo en el arranque”.
- Fallo del sistema de orientación: Un sistema que controlaba el tiempo de funcionamiento del motor de orientación en un mismo sentido mediante un temporizador, provocaba una alarma que detenía el sistema al completo en el caso de permanecer funcionando el motor de orientación a izquierdas o a derechas durante un tiempo excesivo. Se tomaba esta precaución con el objeto de evitar el giro de la góndola en un mismo sentido en el caso de malfuncionamiento del sistema detector de vueltas de góndola. De esta manera se evitaba la ruptura de los cables.
- Temperatura elevada: Si se superaba la temperatura de 85°C en cualquiera de los termopares del sistema se originaba el bloqueo del aerogenerador.

- Fallo de fase: En la situación de producirse una reducción de tensión de cualquiera de las fases por debajo de 50 V saltaba una alarma y acto seguido se ejecutaba la orden de frenado del sistema.
- Vibraciones excesivas: Caso de vibrar la góndola en exceso por causa de mala fijación de alguna pala en el buje o algún otro elemento del chasis se producía la detención del aerogenerador.
- Sobrecarga: Los aumentos de corriente por encima de la intensidad máxima eran detectados por los transformadores de corriente para frenar y desconectar de red el sistema.

#### 2.2.4 Piezas reutilizables

Los elementos de los que se disponen, que están en buenas condiciones para su reutilización y que son capaces de cumplir la función para la que han sido diseñados satisfactoriamente son:

- Los generadores de 30 kW y 7,5 kW.
- El chasis de la góndola al completo.
- Escaleras para acceder a la góndola.
- Balcones de la góndola.
- Las palas.
- El buje.
- La torre.
- La caja multiplicadora.
- Correa de transmisión que acopla G1 con el eje de G2.
- El electrofreno.
- Los ejes de baja y alta velocidad, además del eje de acoplamiento del generador G1.
- El eje-piñón y la corona dentada del sistema de orientación.

El resto de componentes necesarios para el desempeño de la acción generadora deberán sustituirse por otros nuevos por causa de desaparición, deterioro o por obsolescencia, ya que el aerogenerador se encontraba instalado en una época desde la cual el avance tecnológico en materia de energía eólica ha sido apabullante, mejorándose la eficiencia de la generación eléctrica mediante aerogeneradores en gran medida.

El presente proyecto ha tenido como uno de sus objetivos la búsqueda de los componentes de potencia necesarios para completar el sistema y con ellos proporcionar un mejor comportamiento en cuanto a la función que realizan y finalmente lograr un mayor rendimiento del aerogenerador. La unidad de control, el sistema de orientación y los sensores oportunos por los que se ha optado para posibilitar la nueva instalación del aerogenerador PEUI-10 son

descritos con todo detalle en el proyecto anexo al presente. Ambos proyectos cubren todos los ámbitos a tener en cuenta del rediseño del sistema aerogenerador.

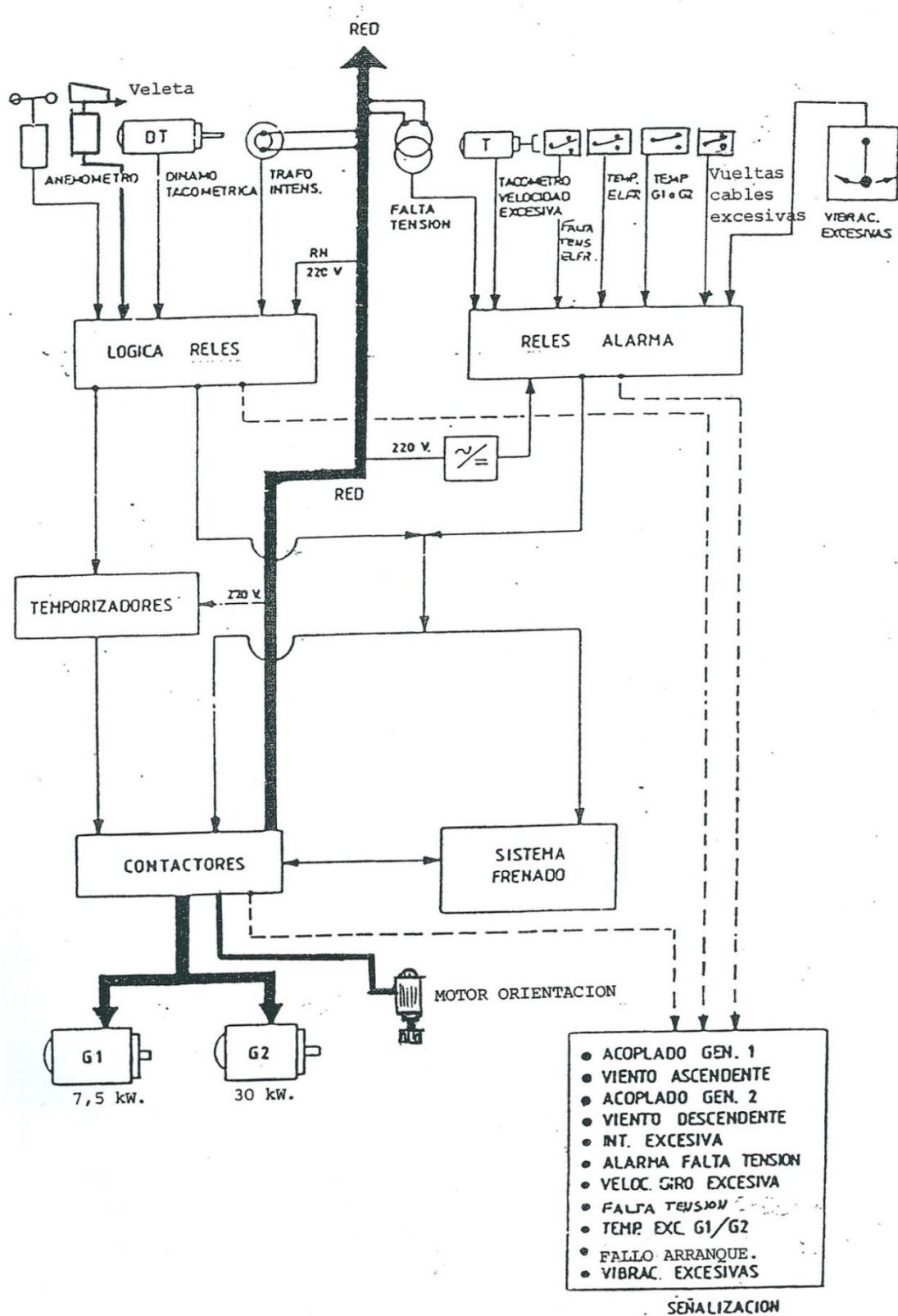


Figura 2.19. Diagrama de bloques detallado del PEUI-10.

### 3 Descripción y análisis comparativo de las posibles soluciones

La realización de este capítulo del presente proyecto tiene como objetivo llegar a establecer la mejor alternativa para el funcionamiento después de un concienzudo estudio sobre las posibles soluciones, analizando las ventajas de cada método y su viabilidad económica.

En primer lugar se deberá dilucidar cuál será el método de control de potencia con el que se regulará el aerogenerador. Cuando hablamos de control de potencia en un aerogenerador nos referimos a los métodos que se realizan para gestionar, optimizar, estabilizar y limitar la captación de energía cinética del viento para ser transformada en energía eléctrica. Para este cometido se han desarrollado varios tipos de tecnologías de distinta índole, de los cuales cabe resaltar el control de *pitch* o control de potencia mediante cambio de paso de pala. Este método, como anteriormente se ha explicado, consiste en el giro de las palas en torno a su eje longitudinal para cambiar el ángulo de ataque con respecto a la velocidad de viento y así regular la fuerza de sustentación que hace girar el rotor. Debido a la formal estructural de la máquina de la que se dispone resulta imposible o más bien inviable realizar el control mediante esta alternativa. Al tratar con un sistema con entrada en pérdida aerodinámica pasiva la instalación de los elementos necesarios (palas móviles, motores...) supondría un déficit económico relevante muy difícil de subsanar en la vida útil del generador.

En vista de tal situación, a la hora de poner en funcionamiento el aerogenerador que nos ocupa nos encontramos ante, en líneas generales, dos alternativas. La primera de ellas consiste en un funcionamiento de la máquina a velocidad constante, esto es, con una conexión a la red directa sin ningún dispositivo que intercepte entre red y aerogenerador. Una conexión directa implica una velocidad de rotor prácticamente fija, ya que la onda de tensión con la que se alimenta el generador es siempre de la misma frecuencia, por lo tanto, la velocidad de sincronismo permanece constante. Una máquina asíncrona nunca trabaja con un deslizamiento muy grande, por tanto la velocidad a la que puede llegar el aerogenerador no está muy alejada de la velocidad de sincronismo.

La segunda opción para conectar a la red un aerogenerador de paso de pala fijo es la operación a velocidad variable del rotor eólico. De esta manera la captación de energía es superior que la de sistemas de velocidad fija puesto que para cargas bajas se reduce la velocidad del rotor, consiguiéndose de este modo una velocidad específica más cercana a la óptima y mejorándose el coeficiente de potencia. Para llevar a cabo este sistema de control será necesario un variador de frecuencia que genere ondas de distintas frecuencias para obtener distintas velocidades de sincronismo. Existe también la posibilidad de trabajar a dos velocidades, ya sea mediante la utilización de dos cajas multiplicadoras, dos bobinas estatóricas distintas para una misma máquina con diferente número de polos o dos generadores distintos.

A continuación se realizará un análisis de qué ventajas ofrece cada alternativa y qué impedimentos se presentan a la hora de establecer cada una de ellas.

### 3.1 Conexión directa a la red

La conexión directa a la red de un sistema aerogenerador es simple, sencilla y en principio económica. No se necesita un variador de frecuencia con puentes inversores y rectificadores de transistores u otros componentes electrónicos que encarecen en gran manera la instalación de la estructura, pero sin embargo es necesario reducir la absorción de corriente en el momento del arranque con algún tipo de arrancador.

En el arranque de un motor asincrónico, como en el de casi todos los motores, el pico de corriente resulta elevado ya que se necesita un par de arranque suficiente para conseguir que el motor comience a girar. Los aerogeneradores se conectan a la red una vez que el rotor eólico ha alcanzado una cierta velocidad, así que la conexión no se produce estando el rotor bloqueado por lo que aparentemente la corriente inicial no debería ser muy elevada. Sin embargo, las bobinas estatóricas están desmagnetizadas y necesitan un gran pico de corriente para magnetizarse y generar consecuentemente el campo giratorio en el entrehierro. Queda justificada de esta manera la necesidad de utilizar un dispositivo que limite la corriente en el momento de conexión para evitar que los componentes eléctricos sufran daños, para reducir el consumo de la red y para minimizar las fluctuaciones de tensión que puedan afectar a otros usuarios de la red.

Por otro lado es muy aconsejable la utilización de sistemas que compensen la energía reactiva consumida por el generador para que no la absorban de la red y producirse así pérdidas económicas. Todas las máquinas asincrónas necesitan una fuente externa que les proporcione energía necesaria para generar el campo magnético que circulante en el entrehierro. En el funcionamiento como generador de la máquina es necesario que por los conductores del rotor circule corriente previamente, en caso contrario el rotor girará sin efecto alguno.

En definitiva, Una conexión directa del generador a la red implica la inclusión de como mínimo un arrancador limitador de corriente y de un compensador de energía reactiva.

#### 3.1.1 Operación a velocidad constante

Realizándose una conexión de un aerogenerador de forma directa, como anteriormente se ha comentado, la velocidad angular del rotor varía en muy pocas revoluciones por minuto, se habla entonces de operación a velocidad constante.

Una velocidad de viento dentro del rango 3-5 m/s será suficiente para poder aprovechar la energía del viento. Cuando el anemómetro detecta esta velocidad, conecta el aerogenerador a la red a través de un arrancador y éste comienza el giro tardando en alcanzar la velocidad de sincronismo varios segundos, ya que a la velocidad de conexión el par ejercido por el viento es muy reducido. Conforme se va elevando la velocidad de viento, el par generado se eleva de igual modo produciendo un aumento en la velocidad de rotor, por lo que el deslizamiento también aumenta y se inyecta mayor cantidad de corriente en la red.

La velocidad de rotor nunca se aleja demasiado de la velocidad de sincronismo independientemente del par que experimente el rotor. Ésta descompensación entre velocidad y par es desfavorable para las piezas mecánicas del rotor, pues experimentan fatigas mecánicas debidas a la oposición que ejerce el generador ya que no permite cambios de velocidad como corresponderían para cambios en el par absorbido.

Una vez el viento llega a la velocidad nominal, el aerogenerador entra en pérdida aerodinámica, esto es, el ángulo de ataque con respecto a la velocidad de viento relativa ha aumentado de tal manera que en la parte superior de la pala el viento forma remolinos, reduciéndose la velocidad de viento en esa zona de la pala y por consiguiente la fuerza de sustentación.

En cuanto a la calidad de energía suministrada a la red, hay que tener en cuenta las fluctuaciones de corriente que estos sistemas proporcionan a la red eléctrica debidas a la naturaleza variable del viento; las ráfagas de viento proporcionan elevaciones de par intermitentes que conllevan corrientes fluctuantes, las cuales son transmitidas a la red eléctrica, implicando caídas de tensión en los líneas de transporte.

Ese tipo de sistema presenta un mal comportamiento frente a huecos de tensión. Cuando estos se producen, el par electromagnético que se opone al movimiento del rotor desaparece y en consecuencia éste comienza a girar más rápido. En el caso de que el hueco se prolongara la máquina se embalaría y produciría daños irreversibles. Por este motivo ante la presencia de hueco el sistema dispara una alarma y se manda la orden de paro. Una vez que el hueco se ha extinguido el generador solicita la correspondiente corriente necesaria para magnetizar las bobinas estatóricas, que a pesar de ser limitada por un arrancador se produce una desestabilización de tensión que dificulta la recuperación de la tensión nominal de la red en el punto de conexión. Para evitar este inconveniente es factible colocar en paralelo al generador un SVC (Static Voltage compensator), de la forma que más adelante será descrita.

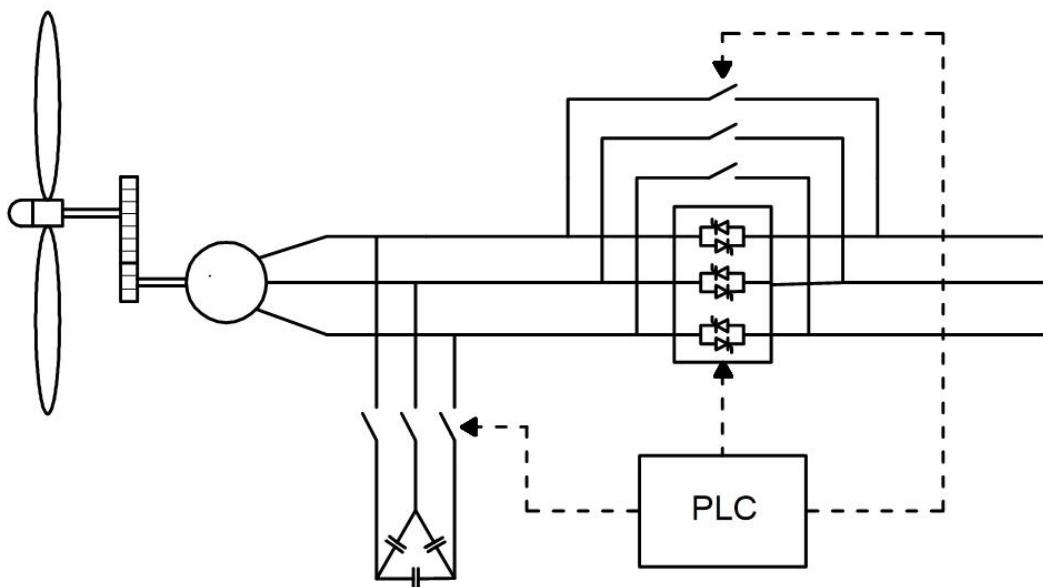


Figura 3.1. Generador asincrono con arrancador suave y compensador de reactiva

El coeficiente de potencia en este tipo de sistemas es bajo para las velocidades de viento más altas que el aerogenerador puede soportar sin deteriorarse y para cargas bajas, tal y como se puede observar en la figura 3.2 para un paso de pala fijo e igual a 0.

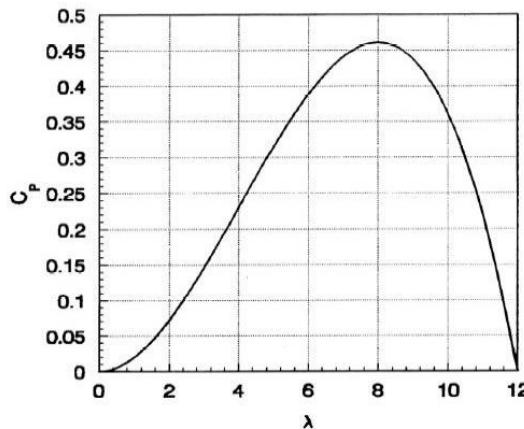


Figura 3.2. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica  $\lambda$ .

A partir de la velocidad de viento más frecuente del lugar donde se desea colocar la máquina se seleccionará una velocidad de giro de rotor. La velocidad angular del rotor eólico depende de la de sincronismo y de la relación de multiplicación del multiplicador, por tanto en función del tipo de generador o de caja multiplicadora se obtendrán distintas velocidades.

La velocidad específica óptima depende del aerogenerador en sí, más en concreto de la forma de sus palas, por consiguiente es un dato que tiene que ser proporcionado por el fabricante de las palas. Conociendo la velocidad específica óptima y la velocidad de viento más frecuente del emplazamiento se puede obtener la velocidad de punta de pala óptima para esa velocidad más veces registrada, al multiplicar esa velocidad por el radio de la pala se obtiene la velocidad angular óptima.

En el caso que nos ocupa si escogíramos esta alternativa para la generación de energía utilizaríramos para tal efecto el generador de 30 KW disponible. Teniendo en cuenta los datos de la tabla 2.1, calculamos la velocidad de viento óptima para nuestra máquina a la velocidad de sincronismo:

$$r = 20$$

$$n_1 = 1500 \text{ r.p.m}$$

$$\lambda_{opt} = 5,7$$

$$R = 5,4$$

$$n_g = n_r \cdot r \Rightarrow n_r = 75 \text{ r.p.m}$$

$$n_r = \frac{2\pi \cdot \Omega_r}{60} \Rightarrow \Omega_r = 7,85 \text{ rad/s}$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\Omega_r \cdot R}{V} \Rightarrow V = 7,44 \text{ m/s}$$

Donde:

$r$ : Relación de multiplicación.

$\lambda_{opt}$ : Velocidad específica óptima.

$\Omega_r$ : Velocidad angular de rotor eólico.

$n_g$ : Velocidad angular en rpm del generador.

$n_r$ : Velocidad angular en rpm del rotor eólico.

$R$ : Radio del rotor eólico.

$V$ : Velocidad de viento óptima.

La velocidad de viento necesaria para conseguir el mayor coeficiente de potencia que puede proporcionar la máquina es de 7,44 m/s. Este aerogenerador presentaría su mejor rendimiento en una zona donde la velocidad de viento estuviera en torno a ese valor habitualmente, aunque resulta difícil que esto ocurra. Para que realmente se alcance el valor de lambda óptimo en el lugar de la instalación sería necesario cambiar el generador o la caja multiplicadora, lo cual no se contempla debido al elevado coste económico que supondría.

Tal y como hemos podido observar, llevar a cabo esta alternativa no resulta la mejor solución: en primer lugar, las cargar mecánicas que experimentan los elementos de transmisión suponen un gran deterioro de los mismos. Por otro lado el aprovechamiento de la energía eólica no es el máximo para casi todo el régimen de operación.

### 3.1.2 Operación a dos velocidades

Existe la posibilidad de trabajar a dos velocidades distintas de giro utilizando un generador con dos devanados estatóricos. El primero de ellos posee mayor número de polos, con lo que se consigue una velocidad de sincronismo menor que conducirá al rotor eólico a girar a una velocidad menor, para que así la máquina presente una velocidad específica que presente mayor coeficiente de potencia para vientos de velocidad baja. El segundo tiene menos pares de polos para conseguir una velocidad de sincronismo mayor a velocidades de viento altas y conseguir el mismo efecto que el anterior.

Otra opción consiste en la utilización de dos generadores distintos, uno mayor que el otro y con distinto número de polos para lograr el mismo objetivo que el método anterior. En la antigua instalación el método aplicado consistía en la utilización de dos generadores de distinta potencia pero con el mismo número de polos, esto es, la velocidad de sincronismo para ambos era la misma. Sin embargo la velocidad en el rotor eólico cuando estaba en funcionamiento G1 era distinta que cuando lo hacía G2, ya que mediante una correa de transmisión que acoplaba el G1 con el eje del G2 se conseguía una relación de multiplicación distinta con el conjunto multiplicador-correa que con sólo el multiplicador.

Debido a la disposición de los dos generadores utilizados antiguamente, elegir este modo de operación resulta ser una opción interesante y económica, razón por la que éste será el método elegido.

Atendiendo al capítulo 1, observamos que los generadores son de 30 kW y de 7,5 kW. A continuación se va a realizar una pequeña demostración de la efectividad de éste método.

En el apartado anterior se ha calculado cuál es la velocidad de viento óptima para el generador de 30 kW:

$$V_2 = 7,44 \text{ m/s}$$

A continuación se realiza el cálculo de la velocidad de viento óptima a la velocidad de sincronismo para el generador pequeño a partir de los datos disponibles:

$$n_{G1} = 1500 \text{ r.p.m.}$$

$$r_1 = 21,4$$

$$n_{G1} = r_1 \cdot n_{R1} \Rightarrow n_{R1} = 70 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{R1} = \frac{2\pi \cdot \Omega_{R1}}{60} \Rightarrow \Omega_{R1} = 7,33 \text{ rad/s}$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\Omega_{R1} \cdot R}{V} \Rightarrow V_1 = 6,94 \text{ m/s}$$

Donde:

$r_i$ : Relación de multiplicación conjunto multiplicador-correa

$V_1$ : Velocidad de viento óptima cuando G1 está en funcionamiento.

$V_2$ : Velocidad de viento óptima cuando G2 está en funcionamiento.

El resto de datos son los mismos que los anteriormente utilizados para el cálculo de la velocidad de viento de G2 pero aplicados a G1.

De estos cálculos se puede interpretar que para velocidades reducidas de viento a una velocidad de rotor menor que para el caso anterior se obtiene un coeficiente de potencia mayor, dado que la velocidad específica a velocidades de viento bajas está más próxima a la velocidad específica óptima.

Con el fin de que no se produzca el cambio de un generador a otro con mucha frecuencia debido a ráfagas de viento o turbulencias intermitentes, y de esta manera perder eficiencia en la captura energética, se introduce una histéresis en la conmutación.

La histéresis implica una conmutación de generadores a distinta velocidad de viento, siendo mayor la del cambio del G1 a G2 que la del cambio de G2 a G1. De esta forma pequeños aumentos o reducciones en el entorno de la plena carga del generador 1 no implicarán muchos cambios sucesivos de generador.

Para realizar tal cometido se puede obtener la velocidad de viento mediante un anemómetro, al cual se le aplica un filtro para rechazar variaciones intermitentes de la velocidad de viento, y mediante una unidad de control que gestione la histéresis. La velocidad de viento a la que G1 alcanza la potencia nominal es cercana a 7 m/s, por tanto cuando se detecte esta velocidad se producirá el cambio de este generador al otro, y hasta que la velocidad de viento no se reduzca por debajo de 6,5 m/s no se realizará otra vez el cambio.

### 3.1.3 Métodos de arranque

Anteriormente se ha explicado la conveniencia de reducir la corriente que en el momento del arranque absorbe el generador de la red, a pesar de realizarse ésta por lo general en torno al 95 % de la velocidad de sincronismo del generador. Esta tarea puede ser llevada a cabo por medio de múltiples métodos, siendo algunos más rudimentarios y otros más sofisticados.

A continuación se expondrán una serie de alternativas y se estudiará con detalle qué ventajas aporta cada uno y qué inconvenientes por contrapartida presentan.

#### 3.1.3.1 Arranque mediante resistencias estatóricas

Los motores de inducción pueden mejorar su comportamiento en el arranque intercalando en serie con sus devanados estatóricos una serie de resistencias para limitar la corriente de arranque. En el instante del arranque la impedancia que presenta el circuito equivalente del motor se reduce a la impedancia de cortocircuito, de pequeño valor. Consecuentemente al ser aplicada la tensión en bornes del motor la corriente absorbida presenta un pico elevado. En lo que respecta al arranque-conexión de los aerogeneradores de velocidad fija, la resistencia de carga del circuito equivalente no es de valor nulo debido a que el rotor ya se encuentra en movimiento, pero el estator solicita intensidad para su magnetización.

Intercalándose en serie con el estator resistencias se consigue aumentar la impedancia global de todo el conjunto y así, frente a la tensión de red se reduce la corriente solicitada. La tensión en bornes del estator se reduce a una tensión inferior a la de red, con lo cual se absorbe menor corriente.

Este método es el más sencillo y de bajo coste inicial de todos los que puedan presentarse, pero su utilización conlleva unos cuantos inconvenientes. En primer lugar, aunque una vez realizado el arranque se cortocircuite las resistencias para anular su efecto, las pérdidas de potencia que generan son bastante considerables, a pesar de que estén presentes sólo mientras dure el arranque, un periodo de tiempo breve.

El gasto producido por estas pérdidas no es compensado en absoluto por la pequeña inversión inicial. A este problema hay que añadirle la disminución de par que conlleva utilizar resistencias estatóricas, puesto que en un motor asíncrono la corriente es proporcional a la tensión y el par está en relación cuadrática con él, de lo que se deduce que la reducción de corriente está en proporción cuadrática con la reducción de tensión. Refiriéndonos a generadores eólicos de velocidad fija este inconveniente no debería sugerir mucho problema dado que el rotor eólico se arranca por acción del viento, aunque en ocasiones el generador debe proporcionar un aporte de par para completar el arranque a velocidades reducidas de viento.

En el caso de que sí se presentara problema pueden incluirse varios escalones de resistencias cuya entrada en operación fuera regulada por software, de tal manera que para el inicio del arranque actúe el mayor número de escalones por ser el momento más crítico, y conforme va transcurriendo el arranque se irán reduciendo éstos hasta que finalice el arranque y se cortocircuite el último escalón.

Esta opción de arranque es la más antigua y sencilla, presentando la gran desventaja de generar costosas pérdidas eléctricas, lo que nos conduce a descartar su utilización.

### **3.1.3.2 Arranque mediante reactancias estatóricas**

Esta técnica es muy similar a la comentada con anterioridad. De igual manera que se hacía con las resistencias, se intercalan en serie con los devanados de la máquina unas reactancias. Su efecto es el siguiente: En el momento que se conecta el generador a la red, las reactancias, debido a su comportamiento inductivo, no admiten cambios bruscos de corriente por lo que la tensión en bornes del estator en ese instante será nula. Conforme transcurre el tiempo la corriente va aumentando exponencialmente hasta llegar a su valor de régimen permanente, y de igual forma lo hace la tensión estatórica. Por consiguiente la tensión en bornes de la máquina aumenta paulatinamente y consecuentemente los devanados absorben corriente de la red de manera gradual.

El aerogenerador con el que trabajamos operaba utilizando esta modalidad de arranque, cortocircuitando las reactancias una vez hubiera terminado el proceso. Consiste en una solución algo mejor que el arranque con resistencias, pero de todos modos las pérdidas por efecto Joule siguen siendo importantes debido a las componentes resistivas de las reactancias y aunque su precio sea reducido no compensa las pérdidas económicas que sugiere el consumo de potencia que suponen.

### 3.1.3.3 Arranque estrella-triángulo

Este tipo de arranque se basa en la conexión inicial del generador en estrella y posteriormente transcurrido un intervalo de tiempo, en triángulo.

Como bien es sabido la tensión que se aplica a cada una de las fases de un generador asíncrono es menor cuando éste está conectado en estrella que en triángulo, puesto que la tensión aplicada es la de fase en estrella y en triángulo es la de línea, superior a la tensión de fase en un factor  $\sqrt{3}$ . Al ser la tensión de menor valor la corriente que circula por el estator también lo será, concretamente 3 veces menor, ya que la corriente de línea (la que circula por cada conductor) en conexión triángulo es  $\sqrt{3}$  la de cada fase del motor y esta última a su vez es  $\sqrt{3}$  veces superior a la de fase en conexión estrella.

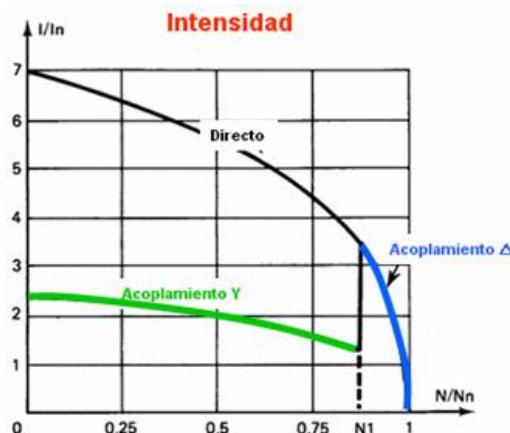


Figura 3.3. Curva corriente-velocidad en un arranque estrella-triángulo.

Como puede observarse en la imagen 2.3, al realizarse el cambio de conexión se produce un cambio brusco en la corriente absorbida por la máquina. Esta variación rápida de intensidad implica caídas de tensión en los elementos inductivos conectados a la red, provocando así fluctuaciones de tensión que afecten a otros usuarios de la red e incluso provocar sobretensiones en los dispositivos con el consiguiente riesgo que ello conlleva. Este aspecto poco favorable de este modo de arranque lo convierte en una solución mediocre, aunque en todo caso resulta mejor alternativa que la utilización de resistencias o reactancias, cuyas pérdidas devalúan mucho esos métodos.

Los generadores con los que se trabaja están preparados para trabajar en triángulo, con lo cual la aplicación de este método no es posible ya que los generadores están conectados en estrella.

### 3.1.3.3.1 Arranque mediante autotransformador

Un autotransformador reductor presenta una tensión en bornes del secundario considerablemente inferior a la tensión aplicada en secundario. El fundamento de este método consiste en la inclusión de un autotransformador en serie con las bobinas de estator, de forma que el primario se conecte a la red y el secundario a los bornes de la máquina.

Normalmente la actuación del autotransformador perdura hasta que se estabiliza la velocidad en el motor, seguidamente se puentea este y la máquina opera con la tensión de red a partir de éste momento. De la misma forma que ocurría para los arrancadores estrella-tríangulo se produce una variación de tensión repentina en bornes del motor en el instante que se produce la conmutación, acarreando las consiguientes fluctuaciones de tensión en el punto de conexión.

Los autotransformadores son materiales con un coste elevado, tanto es así que su precio se asemeja al de los arrancadores estáticos, en el entorno de los 1000 € para una potencia nominal del orden del generador grande de nuestro sistema eólico. Por tanto, La utilización de un autotransformador en el arranque para nuestra aplicación conforma una opción poco viable.

### 3.1.3.4 Arrancador estático o graduador

El arrancador estático o graduador trifásico es un dispositivo formado por 6 o 4 tiristores, dependiendo del modelo, de manera que para cada fase controlada de un sistema trifásico se disponen dos tiristores en antiparalelo. Estos pares de tiristores se conectan en serie con los devanados de los motores de inducción.

Su forma de operar es la siguiente: Cuando comienza el proceso de arranque, se disparan los tiristores a un ángulo de disparo máximo, para el cual el ángulo de conducción resulta ser nulo (el ángulo máximo de disparo depende de la carga). A partir de ese instante comienza a reducirse el ángulo de disparo de forma gradual (de ahí el nombre de *graduador*) aumentando en consecuencia los ángulos de conducción de los tiristores. Aumentando el ángulo de conducción se consigue obtener una tensión eficaz cada vez mayor en los bornes del estator.

Con un graduador trifásico es posible controlar la tensión que se le comunica en cada momento a una máquina asincrónica, con lo cuál con este dispositivo se le aplica a ésta una tensión eficaz creciente en rampa desde un valor inicial que depende del par necesario para producir el arranque hasta la tensión nominal en un tiempo de rampa pre establecido por el usuario y que depende de las características de la máquina y de la carga del motor.

Las ondas de tensión que se presentan en las bobinas del estator no tienen forma senoidal, sino que son tramos de senoide. Conforme el ángulo de conducción de los tiristores aumenta, mayor se hace el valor de la tensión eficaz de la onda resultante.

Si únicamente tenemos en cuenta al armónico fundamental de la onda de entrada al estator, el resultado de la acción del graduador sería la aplicación de ondas senoidales de tensión en las bobinas del estator con amplitud variable en el tiempo, de forma que las ondas de corriente que circularían por el motor serían igualmente senoidales, cuya amplitud aumentaría en la misma proporción y al mismo ritmo. Consecuentemente el par del motor también aumentaría, pero guardando una relación cuadrática con esta última.

Éste es un supuesto ideal, ya que la onda de salida del graduador introduce armónicos en la máquina de orden superior al fundamental además de éste, provocando varios problemas, tales como la aparición de pares parásitos, calentamientos excesivos, vibraciones y ruidos, los cuales serán analizados más adelante.

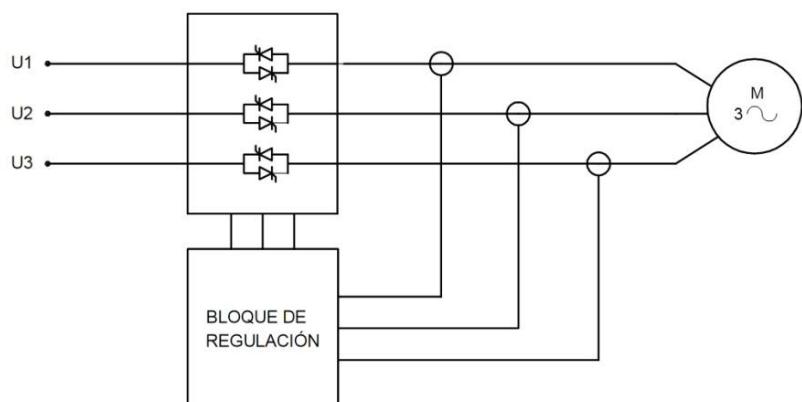


Figura 3.4 Diagrama de bloques de un arrancador estático.

A diferencia de los arranques producidos por autotransformadores y conexiones estrella-tríangulo, la corriente no sufre ninguna variación de forma brusca e instantánea, sino que su elevación se realiza de forma lenta y suave hasta que se alcanza el valor de régimen permanente.

En un gran número de aplicaciones es necesaria una corriente inicial de valor considerable capaz de producir el par acelerador requerido para poner en movimiento la inercia del motor sumada a la del elemento acoplado. Por este motivo es crucial que la rampa de tensión no comience desde 0 sino que su valor inicial sea del orden del 30 % de la tensión nominal para tener un control completo del arranque.

### Control del arrancador

El algoritmo de control que genera los disparos de los tiristores suele estar controlado por un microprocesador, el cual genera una rampa de tensión que sirve de referencia para un bucle en lazo cerrado. La consigna que se introduce en el bucle de regulación es el tiempo deseado para que se realice el arranque. Mediante la ecuación 3.1 se obtiene el par medio desarrollado por la máquina, requerido para realizar el arranque en el tiempo fijado en la consigna.

A partir de éste, y por medio de la ecuación 3.2 que relaciona el par electromagnético interno con la tensión aplicada en una máquina asincrónica, se obtiene la referencia de tensión de rampa, cuya duración es del tiempo prefijado.

$$t_{arr} = J \cdot \frac{\overline{M_{mt}} - \overline{M_{res}}}{\Omega}$$

[Ec.3.1]

$$M_{mt} = \frac{3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot U_e^2}{\frac{2\pi}{60} \cdot n_1 \cdot \left[ \left( R_e + \frac{R'_2}{s} \right) + (X_e + X'_2)^2 \right]}$$

[Ec.3.2]

Asimismo existen arrancadores regulados en corriente. El funcionamiento del bucle de control es de la siguiente manera: una consigna de corriente establecida previamente se compara con la corriente eficaz real que circula por la máquina, de forma que el resultado de esta comparación, llamado error, es comunicado a un regulador, generalmente un PID. La salida del regulador proporcionará un valor al microprocesador proporcional al ángulo de disparo necesario para que la intensidad real siga a la de referencia. Mediante un control PWM se gestionarán los transformadores de impulsos que provocarán el disparo de los tiristores. La rampa de referencia estará comprendida entre el valor ajustado inicialmente y el valor correspondiente al de corriente nominal.

Algunos arrancadores incluyen la función de limitación de intensidad, que puede actuar de forma independiente a la rampa de tensión o complementando a ésta. En el caso de limitación de corriente sin rampa de tensión el arranque comienza aumentando la corriente hasta alcanzar dicha limitación, momento a partir del cual el resto del proceso tiene lugar a corriente constante.

### **Funciones complementarias**

La gran mayoría de fabricantes de arrancadores suaves incluyen, además de la función principal de arranque en rampa, otro tipo de aplicaciones que pueden ser llevadas a cabo por un graduador, tales como la parada suave, la elevación de la tensión en el inicio del arranque y la optimización de la energía para operación con cargas bajas.

La parada suave se emplea para casos en los que la inercia que se presenta en eje del rotor del motor es baja, ya que la detención del eje del rotor una vez anulada la tensión en bornes del motor puede resultar muy brusca, consiguiéndose de este modo un deterioro de los elementos de transmisión mecánicos del sistema. Éste es el caso de bombas centrífugas y de cintas transportadoras.

Una rampa de tensión de valor negativo será la solución para producir una parada suave. Esta rampa suele ser, por lo general, del doble de duración que las rampas de arranque.

La función de parada suave puede resultar interesante teniendo en cuenta la disminución paulatina de tensión en bornes del motor, que implica un descenso de la corriente más lento y no generándose de esta manera variaciones de tensión en la red, debidas a las componentes resistivas e inductivas de las líneas.

Otra de las funciones que suelen proporcionar los arrancadores estáticos es la elevación de tensión transitoria en el comienzo del arranque, función que usualmente es denominada como "Kick-start". La razón por la que se eleva la tensión radica en la gran magnitud del par resistente que ofrecen algunas máquinas en bloqueo.

Esta elevación de tensión es total, es decir, la tensión aplicada será la nominal del motor y se aplicará durante menos de 10 períodos de red, tiempo suficiente para que se haya podido vencer el par resistente de la carga. Una vez transcurrida esta fase inicial, se disminuye la tensión y se finaliza el arranque con control por rampa de tensión, para reducir en la medida de lo posible la corriente absorbida.

Por último, cabe analizar la función de ahorro energético en funcionamiento con cargas bajas. La máquina asíncrona presenta prácticamente las mismas pérdidas magnéticas para todo régimen de carga, siempre y cuando la tensión de alimentación no varíe. Cuando el rotor de la máquina solicita un par mecánico elevado, la velocidad de la máquina decae para que la velocidad relativa entre la velocidad de sincronismo y la de rotor aumente, consecuentemente el deslizamiento se hace mayor. De acuerdo con la expresión de la corriente en una máquina asíncrona, este aumento de deslizamiento implica un aumento de corriente a través de los bobinados del estator, como puede demostrarse con la ecuación 3.3. En contrapartida, si la carga mecánica experimentada en rotor es baja, la velocidad de rotor aumenta con respecto a cargas altas pues la velocidad relativa necesaria es inferior que la del caso anterior.

En consecuencia, el deslizamiento decae y la corriente por el estator aumenta, según la ecuación 3.3.

[Ec.3.3.]

Ahora bien, Estas variaciones de corriente que se producen en el rotor de la máquina en función de la carga acoplada en el rotor no influyen en la corriente absorbida por el estator para magnetizar la máquina.

Si observamos el circuito equivalente de un motor asíncrono, podemos denotar que al encontrarse en paralelo la rama de rotor con la rama de magnetización del entrehierro, las corrientes que circulan por sendas ramas son independientes entre sí y la que circula por la rama de magnetización únicamente depende de la tensión aplicada.

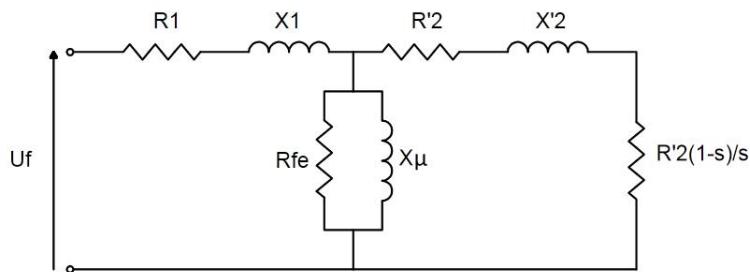


Figura 3.5. Circuito equivalente de un motor asincrónico.

Por consiguiente, resultaría interesante reducir la tensión aplicada a la máquina en el caso de operar con cargas bajas, con el fin de reducir la corriente absorbida por la rama magnética del circuito equivalente. Esta reducción de tensión implicaría una velocidad de giro de motor menor que si no se lleva a cabo ésta, pero se reducen las pérdidas originadas por la magnetización considerablemente. Para llevarse a cabo esta función con un graduador la estrategia a seguir consiste en un funcionamiento continuado de éste y aumentar los ángulos de disparo cuando se trabaja con cargas reducidas. Para ello el microprocesador del dispositivo se encarga de detectar los pasos por cero de la tensión y la corriente, determinando el factor de potencia. Si éste resulta muy bajo, como ocurre para cargas bajas, el microprocesador ejecuta la orden de disparar los tiristores a mayores ángulos para optimizar el rendimiento de la máquina.

Esta función de los arrancadores puede parecer muy ventajosa a priori, pero debido al contenido armónico de corriente que introduce el graduador trabajando de forma continua, las pérdidas energéticas producidas por éstos hacen que el ahorro energético sea relativo. Únicamente si el motor se ve razonable su uso si el motor trabaja gran parte del tiempo con cargas bajas.

### Módulo de potencia

El módulo de potencia de un arrancador está formado fundamentalmente por los tiristores que controlan la tensión de salida. En cada fase controlada están dispuestos dos tiristores en oposición o en antiparalelo, de forma que cada uno de ellos permite la conducción en un semiciclo de red, el negativo o el positivo. Cada tiristor puede conducir un máximo de  $180^\circ$ , ya que éste es el desfase entre el disparo de uno y otro en una misma fase.

Otros elementos que se encuentran en el módulo de potencia son:

- **Varistores:** componentes de potencia colocados entre los tiristores y tierra. Su función es proteger contra sobretensiones a los semiconductores; si se produce una sobretensión a la entrada de las fases de los graduadores los varistores disminuyen su resistencia eléctrica y por tanto reducen la tensión en sus bornes.
- **Redes snubber:** Las redes snubber consisten en un condensador y una resistencia en serie colocados en paralelo a las parejas de tiristores. Tienen como misión ralentizar el cambio de la tensión en bornes de los tiristores cuando uno de ellos deja de conducir.

De esta manera se consigue evitar que el tiristor que no se encontraba en conducción dispare indebidamente por el efecto  $dv/dt$ .

- **Transformadores de impulsos:** Los transformadores de impulsos son los encargados directos de disparar los tiristores, pues transforman la onda rectangular de salida de los PWM en impulsos de corta duración y de alta intensidad para conseguir un disparo efectivo y reducir el consumo evitando la prolongación innecesaria de los pulsos de disparo.

### Efectos perjudiciales de un graduador

Como se ha comentado anteriormente, los graduadores trifásicos generan *armónicos* tanto de tensión como de corriente, que conllevan efectos en la máquina y en la red no satisfactorios.

Los *armónicos de tensión* dependen del deslizamiento, del tipo de jaula de ardilla del rotor y de la tensión eficaz del armónico fundamental, la cual depende del ángulo de disparo de los tiristores. Los armónicos de tensión inyectados en el motor son de orden impar y no divisibles por 3. Los más importantes son los armónicos 5º, 7º y 11º. Los armónicos 5º y 11º producen armónicos de intensidad de campo magnético que circulan en el mismo sentido que el armónico fundamental de campo magnético, no así como el armónico 7º que gira en dirección opuesta al fundamental. El armónico con mayor amplitud es el 5º. Conforme menor sea el ángulo de disparo y más similar sea la onda de tensión a la de su armónico fundamental, menor es la carga armónica.

Los *armónicos de corriente* introducidos en la máquina son consecuencia de los armónicos de tensión, y su amplitud es función del tipo de jaula, del deslizamiento y de la carga mecánica que experimente el rotor. Sus armónicos son del mismo orden que los de tensión y los más relevantes son nuevamente el 5º, 7º y 11º. La amplitud de éstos no es muy elevada, siendo la de los armónicos 5º y 7º del 10% de la amplitud del fundamental. Por otro lado, el efecto de los armónicos de corriente sobre la red depende de la impedancia de las líneas de transporte; si éstas son muy altas las pérdidas por efecto Joule serán mayores.

Los efectos nocivos sobre las máquinas asíncronas que conlleva la utilización de un graduador son:

#### Pérdidas por efecto Joule

Debido a las corrientes armónicas que se introducen en el estator de la máquina, se disipa potencia originada por éstas en los devanados, considerada como de pérdidas por efecto Joule. La potencia de pérdidas se puede calcular mediante la diferencia de la corriente eficaz utilizando un graduador y no utilizándolo.

#### Pérdidas suplementarias

Funcionando el motor con alimentación senoidal, se producen pérdidas debidas a los flujos dispersos que inciden sobre componentes estructurales de la máquina.

Si se alimenta con una tensión no senoidal a la máquina, como ocurre cuando se intercepta un graduador entre red y máquina aparecen campos magnéticos de las frecuencias de los armónicos (5º, 7º, 11º). Estos campos generan pérdidas adicionales sobre las pérdidas con alimentación sinusoidal.

#### Pares suplementarios parásitos

Los armónicos de orden 5º y 11º generan campos magnéticos giratorios que circulan en sentido opuesto al giro del campo magnético originado por el armónico fundamental, por tanto el par total desarrollado es inferior al que se ejercería si se alimentara al motor con una onda de tensión senoidal igual a la del primer armónico. Por otro lado el armónico 7º produce un campo giratorio del mismo sentido que el fundamental, por lo que se suma a éste. Su aportación no resulta muy efectiva dada la alta frecuencia del armónico.

El deslizamiento de los campos magnéticos generados por los armónicos con respecto a la velocidad de rotor viene dado por la siguiente ecuación:

$$s_k = 1 - \frac{1 - s_1}{k}$$

[Ec.3.4]

Donde:

k: Orden del armónico

$s_k$ : Deslizamiento del campo magnético de orden k

$s_1$ : Deslizamiento del armónico fundamental

#### Pares pulsatorios parásitos

Además de los pares anteriores de carácter constante, existen otro tipo de pares originados por los armónicos de naturaleza alterna, cuyo valor medio es nulo. Se originan por causa de la interacción de los armónicos. Estos pares oscilan en torno al valor 0 con una frecuencia que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$f_p = f \cdot (k - 1)$$

[Ec.3.5]

Donde:

$f_p$ : frecuencia del par pulsante

f: frecuencia de la red

#### Calentamiento adicional

El calentamiento producido por los armónicos de corriente durante el proceso de arranque en los devanados es de pequeña magnitud, ya que el proceso de arranque transcurre en un breve período de tiempo frente a la duración del estado permanente de la máquina. Sin embargo, ya que gran parte de la energía disipada en los devanados se invierte en calentarlos, a la larga este calentamiento puede facilitar el deterioro prematuro de las máquinas.

Si el graduador se encuentra funcionando con el modo de ahorro energético anteriormente comentado el calor generado por causa de los armónicos cobra mayor importancia.

#### Pérdidas en el graduador

Las pérdidas energéticas que se originan en el interior del arrancador estático se dividen en pérdidas en los tiristores, pérdidas en el sistema de control y pérdidas en las redes snubber.

Las pérdidas en los tiristores se originan por la conducción de la corriente que circula por los mismos, con diferencia las de mayor importancia, y por el disparo necesario para ponerlos en conducción. Ya que las pérdidas de conducción son considerables, resulta interesante la opción de puentejar los tiristores una vez finalizado el arranque.

Las pérdidas en el sistema de control se deben a los transformadores de medida de tensión y corriente, a los transformadores de impulsos que provocan los disparos y a la alimentación necesaria del microprocesador.

#### **3.1.4 Modelos de arrancadores estáticos**

En vista de las ventajas que aporta la inclusión de un arrancador estático que limite y regule la intensidad absorbida en el momento de conexión a la red eléctrica de un motor asincrónico, además de lograr que la máquina absorba la corriente de arranque de manera gradual, el método de arranque finalmente elegido será esta alternativa.

Por ello, se ha realizado un profundo análisis de mercado de graduadores de distintos fabricantes para posteriormente optar por el modelo cuyas características sean óptimas para la función de la máquina que nos ocupa, la generación eólica.

En primer lugar, es necesario establecer la *corriente de empleo*  $I_e$  propia del generador de mayor tamaño que va a ser utilizado en el sistema aerogenerador. Para su cálculo se hará uso de la expresión de la potencia en una máquina asíncrona:

$$P = \sqrt{3} \cdot I_l \cdot V_l \cdot \cos \varphi$$

Donde:

$P$ : Potencia absorbida por la máquina

$I_l$ : Corriente de línea

$V_l$ : Tensión de línea

$\cos \varphi$ : Factor de potencia de la máquina correspondiente al régimen de carga.

Se dispone de los siguientes valores correspondientes al funcionamiento en plena carga:

$$P_n = 30 \text{ kW}$$

$$V_{ln} = 380 \text{ V}$$

$$\cos \varphi_n = 0,87$$

Por tanto, la corriente de línea nominal será:

$$I_l = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87} = 52,39 \text{ A}$$

De este modo, todos los posibles arrancadores estáticos planteados estarán dimensionados para una corriente de empleo igual al anterior valor o superior.

En un principio puede parecer que no es necesaria una corriente de empleo de estos equipos igual a la corriente nominal del generador, ya que la conexión de este a red se realiza cuando el rotor eólico gira a una velocidad en torno al 95% de la corriente de sincronismo del generador. Sin embargo, como anteriormente se ha explicado, la corriente absorbida en el momento de conexión de las máquinas asíncronas, aunque el rotor se encuentre en movimiento, puede llegar a ser de 5 a 20 veces la intensidad de plena carga si la corriente no se limita, puesto que los bobinados estatóricos deben magnetizarse. Por consiguiente es más que razonable implantar un arrancador dimensionado para soportar corrientes del orden de la intensidad nominal de la máquina, pudiendo trabajar con sobrecarga durante varios segundos.

Otro aspecto importante que se va a tener en cuenta en los modelos estudiados será la existencia de interruptores de puenteo (*Bypass*) incluidos en los dispositivos arrancadores, ya que las pérdidas de potencia que se producen en los semiconductores son considerables, por lo tanto resulta interesante evitar la circulación de corriente a través de ellos cuando no es necesaria la operación del graduador, es decir, en operación de régimen permanente. Además de este modo la vida útil de los tiristores se alarga al conducir durante breves lapsos de tiempo durante el funcionamiento del aerogenerador. Al disponer de estos interruptores de forma integrada en el dispositivo, se reduce el coste total ya que no se tiene que incluir un contactor externo adicional para realizar el puenteo.

Cabe resaltar también la cantidad de arranques por hora que pueden soportar sin deteriorarse los graduadores planteados. Atendiendo la *ITC-BT-40*: "Para generadores eólicos la frecuencia de las conexiones será como máximo de 3 por minuto", por lo que estarían permitidos 180 arranques a la hora. En nuestro caso, ya que el algoritmo de control está realizado de tal manera que no permite la conexión del aerogenerador si la velocidad del viento no supera los 4 m/s durante 10 minutos, así que en el caso más extremo se presentarían 6 conexiones a la red por hora, en este caso con un ciclo de servicio muy bajo, cantidad muy inferior a la máxima permitida por la instrucción. Por tanto, se tendrán en cuenta arrancadores cuya frecuencia de arranques sea mayor a 6 para ciclos de servicio bajos. Para todos los arrancadores planteados el número de arranques por hora corresponderá a un ciclo de servicio de  $D = 0,5$  en servicio intermitente *S4*, según la norma *UNE 20- 113*, una corriente en el arranque de 3,5 veces la nominal y una duración de arranque de 4 segundos.

Asimismo se valorará la inclusión en el dispositivo de un contacto de relé que cierre cuando se ha realizado el puenteo interno, para que de este modo el PLC correspondiente detecte cuando se ha realizado éste y puedan cerrarse los contactores que conectan las baterías de condensadores de compensación de energía reactiva a los bornes del generador. Las baterías de condensadores no están directamente conectadas a la máquina ya que durante el funcionamiento del arrancador las ondas de tensión a su salida manifiestan cambios en la tensión muy breves e intensos.

Esto conduciría a una gran absorción de corriente por parte de los condensadores frente a estos cambios bruscos, con los inconvenientes que ello conlleva, tanto para la red como para los propios condensadores.

Por último, se tendrán en cuenta características como los sistemas de protección que estos dispositivos incluyen, sus sistemas de regulación del arranque y sobretodo el número de fases controladas por el arrancador, es decir, la cantidad de tiristores que contiene, ya que como más adelante podrá observarse en el capítulo de simulación es un factor importante.

### 3.1.4.1 Arrancadores ABB

#### Arrancador PSR

El arrancador de la gama PSR que utilizaríamos para nuestro propósito es el PSR60, cuyas características son las siguientes:

- Fases controladas:	2
- Intensidad nominal:	60 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	240 V CA/ 24 V CC
- Capacidad de arranque:	4.I <sub>n</sub> durante 6 s
- Arranques/h:	10
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	2,2 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Rampa de tensión.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Ajustes potenciométricos.	
- Parada suave.	
- Pilotos de señalización	
- Precio:	356 €

Este modelo de arrancador corresponde a la gama más baja de los arrancadores de ABB, debido a que únicamente controla dos fases y no contiene integrada ninguna protección. El arranque se realiza con control por tensión en rampa. Una de las ventajas que ofrece es su pequeño tamaño, lo que permite reducir las dimensiones del armario de potencia en el que irá alojado. Por otro lado, la función de *parada suave* que incluye resulta ventajosa ya que ésta evita la anulación brusca de corriente que produce caídas de tensión importantes.

Los potenciómetros de ajuste son tres.

El primero establece el tiempo de rampa de tensión, desde 1 a 20 s; el segundo fija la tensión eficaz inicial del arranque y final de la parada mediante un único potenciómetro, pudiéndose variar entre el 40% y el 70% de la tensión nominal; finalmente el tercero establece el tiempo que se prolonga la parada suave, pudiéndose variar éste entre 0 y 20 s. En cuanto a los diodos LEDs de señalización se refiere, este arrancador dispone de 2, uno para señalizar el funcionamiento del dispositivo y el otro para indicar cuando se puentean los tiristores.

El control de dos fases del motor conlleva problemas importantes, como son el aumento de corriente en el arranque y el desequilibrio de corrientes de fase. Estos aspectos serán analizados con detalle en el capítulo quinto. Ésta es la razón por las que se ha descartado este dispositivo, a pesar de su asequible precio.

### **Arrancador PSE**

El arrancador de la gama PSE planteado para nuestra aplicación es el PSE60, cuyas características más relevantes son las siguientes:

- Fases controladas:	2
- Intensidad nominal:	60 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	250 V CA/ 24 CC
- Capacidad de arranque:	4.I <sub>n</sub> durante 10 s
- Arranques/h:	20
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	2,4 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Control de par.	
- Rampa de tensión.	
- Limitación de intensidad.	
- Bypass integrado.	
- Protección frente a sobrecarga de generador.	
- Protección frente a sobrecarga de tiristores.	
- Protección frente a fallo de fase.	
- Protección frente a fallo de bypass.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Relé de fallo.	
- Pantalla retroiluminada.	
- Teclado.	
- Parada suave.	
- Pilotos de señalización.	
- Precio:	600 €

Este modelo de arrancador es ligeramente mejor al anterior. Como podemos observar el control sigue siendo en dos fases, pero se incluyen funciones adicionales y las prestaciones en cuanto a protecciones del aparato y generador son mucho mayores.

En primer lugar, observamos que este modelo permite un arranque en rampa de tensión con limitación de corriente. El funcionamiento de este tipo de control es el siguiente: El graduador va aumentando progresivamente la tensión en bornes del motor hasta alcanzar la tensión nominal y en ese momento se realiza el puenteo. Si durante el proceso de arranque se supera la intensidad límite, en el momento en que se supera ésta la tensión de salida del arrancador se disminuye para en consecuencia reducir la corriente.

Si la corriente sigue aumentando la tensión disminuirá más y si permanece fija en el valor límite el ángulo de disparo de los tiristores se mantendrá constante.

Asimismo el arrancador ofrece una regulación del par desarrollado por la máquina en el momento del arranque. Para realizar este control se detectan la corriente de fase y la tensión en bornes del motor mediante transformadores internos, para que el microprocesador del sistema obtenga el par electromagnético de la máquina asíncrona por medio de la expresión de par en un motor asíncrono. El control del par se realiza en lazo cerrado, comparándose la referencia de par ajustada por el usuario con el par real desarrollado por la máquina. Para este tipo de control es necesario introducir en el sistema los parámetros de la máquina utilizada.

En cuanto a protecciones, el PSE integra protección frente a sobrecarga del motor, pudiéndose elegir la clase del relé de sobrecarga electrónico interno, que dependerá del tipo de arranque. También protege frente al aumento excesivo de la temperatura de los tiristores, al fallo de fase y al fallo de puenteo.

En caso de aparición de estos eventos, se abre un contacto de relé externo que debe ser intercalado en serie con la bobina de alimentación de un contactor externo para realizar la desconexión.

La interfaz de usuario de este modelo es más sofisticada que la del anterior. A través de una pantalla iluminada pueden visualizarse los valores de la corriente eficaz, la potencia aparente, el factor de potencia, etc. Los ajustes se realizan mediante cuatro teclas dispuestas a tal efecto que permiten navegar por la pantalla para asignar funciones al arrancador y establecer los parámetros a los valores deseados. Además, el sistema cuenta con 4 LEDs situados en la parte superior de la pantalla que indican fallo en del dispositivo, el estado del arrancador (funcionamiento, paro), el puenteo de los tiristores y desconexión del sistema por aplicación de una protección interna.

En definitiva, este dispositivo ofrece mayores prestaciones que el analizado anteriormente, pero su control sigue siendo en dos fases, lo que devalúa en gran medida el arrancador.

### Arrancador PSS

El arrancador de la gama PSS de ABB planteado para nuestra aplicación es el PSS60-105, cuyas características más relevantes son:

- |                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| - Fases controladas:          | 3                 |
| - Intensidad nominal:         | 60 A              |
| - Tensión nominal:            | 400 V CA          |
| - Tensión de control nominal: | 250 V CA/ 24 V CC |

- Capacidad de arranque:	4.I <sub>n</sub> durante 10 s
- Arranques/h:	30
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	3,8 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Rampa de tensión.	
- Limitación de intensidad.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Relé de fallo.	
- Ajustes potenciométricos.	
- Parada suave.	
- LEDs de señalización.	
- Precio:	474 €

Como puede observarse en sus características, el arrancador PSS proporciona menores prestaciones que el arrancador PSE en cuanto a protección y tipos de control. Por otro lado, su gran ventaja radica en que las fases que regula son 3, es decir, todas las fases de la máquina, lo cual conlleva un mejor comportamiento sobre el generador del PSS frente al PSE, tal y como se analizará en capítulos posteriores. Además, el precio de este modelo es más reducido que el del anterior. De este modo, a pesar de no incluir protecciones, el PSS resulta mejor alternativa que el PSE.

Para evitar las pérdidas de potencia en conducción de los tiristores sería necesario implantar un puenteo externo, ya que este modelo no lo lleva incluido. Por tanto, el precio final resultaría de la suma del precio del arrancador y de un contactor de puenteo, siendo éste de una intensidad nominal suficiente.

Si se desea realizar un control de rampa de tensión con limitación de intensidad se debe conectar un transformador de corriente externo al dispositivo, con lo cual el precio ascendería de nuevo.

Las consignas que se introducen en este arrancador son de tiempo de rampa de arranque (1s-30s), de tensión inicial (30%-70%), ajustada en función del par resistente de arranque y de tiempo de rampa de parada (1-30s). Los pilotos de señalización indican el fallo del dispositivo, el fallo externo, el funcionamiento/desconexión del dispositivo y el final del arranque.

### Arrancador PSTB

El arrancador de la gama PSTB planteado para nuestro cometido es el PST60, cuyas características son:

- Fases controladas:	3
- Intensidad nominal:	60 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	250 V CA/ 24 V CC
- Capacidad de arranque:	3.I <sub>n</sub> durante 15 s

- Arranques/h:	30
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	5 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Limitación de intensidad.	
- Rampa de tensión.	
- Control de par.	
- Protección frente a sobrecarga de generador dual.	
- Protección frente a sobretemperatura de tiristores.	
- Protección frente a cortocircuito en tiristores.	
- Protección frente a desequilibrio de fases.	
- Protección frente a inversión de fases.	
- Protección frente a fallo de fase.	
- Protección frente a sobreintensidad ( $8.I_n$ ).	
- Protección frente a sub y sobrefrecuencia.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Relé de fallo.	
- Salida analógica indicadora de corriente, tensión y factor de potencia.	
- Pantalla LCD.	
- 4 teclas para ajustes.	
- Parada suave.	
- Pilotos de señalización.	
- Precio:	882 €

La gama de arrancadores PSTB corresponde a la gama más alta de arrancadores de ABB. Esto es debido por un lado al control de las tres fases de la máquina durante el arranque y por otro al elevado número de protecciones y funciones que integra.

La protección contra sobrecarga de la máquina se realiza con dos relés de sobrecarga internos, uno para el arranque y el otro para el funcionamiento continuo. De esta manera se puede ajustar el relé de sobrecarga en operación normal a la corriente de empleo de la máquina sin tener en cuenta el arranque.

Las protecciones de sobreintensidad y cortocircuito de tiristores, fallo de fase y de sub y sobrefrecuencia deben ser complementadas mediante un contactor externo, ya que ante estos eventos el dispositivo únicamente abre el contacto externo de un relé, el cual se debe conectar en serie a la bobina de alimentación de un contactor que abra el circuito de potencia, en caso contrario estas protecciones no surten efecto. Asimismo, si no se produce el puenteo o se detecta fallo en los algoritmos del microprocesador dicho contacto también abre.

En vista de todas las características que presenta el modelo PSTB, éste resulta una opción interesante. Además de estar controlado en 3 fases, sus modos de funcionamiento y las protecciones que lleva a cabo hacen que sea un dispositivo de alta calidad. Su mayor inconveniente es el coste que supone.

### 3.1.4.2 Arrancadores SIEMENS

#### Arrancador 3RW30

El arrancador estático del modelo SIRIUS 3RW30 de la firma SIEMENS planteado para realizar la función de arranque del aerogenerador es el 3RW30 44, cuyas características se recogen en la siguiente lista:

- Fases controladas:	2
- Intensidad nominal:	63 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	230 V CA/ 24 V CC
- Capacidad de arranque:	3.I <sub>n</sub> durante 6 s
- Arranques/h:	17
- Sobrecarga máxima:	1,15. I <sub>n</sub>
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	1,7 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Rampa de tensión.	
- Ajustes potenciométricos.	
- Pilotos de señalización	
- Precio:	413 €

El arrancador 3RW30 es el más compacto y ligero de todos los analizados en este proyecto. Esto se debe a su control en dos fases y a que no dispone de ninguna protección interna.

Las variables que pueden ser manipulados por el usuario mediante los potenciómetros de ajuste son el tiempo de arranque, ajustable entre 1s y 10 s, y el valor de la tensión inicial, ajustable dentro del rango comprendido entre el 40% y el 100% de la tensión de red.

Por analogía en estructura y funciones lo comparamos con el arrancador PSR. El arrancador PSR posee las ventajas respecto al 3RW30 incluir la función de parada suave y de presentar un precio más económico.

#### Arrancador 3RW40

El arrancador del modelo SIRIUS 3RW40 de la firma SIEMENS planteado es el 3RW40 37, cuyas características son:

- Fases controladas:	2
- Intensidad nominal:	63 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	230 V CA/ 24 V CC
- Capacidad de arranque:	3.I <sub>n</sub> durante 6 s

- Arranques/h:	17
- Sobrecarga máxima:	1,15. $I_n$
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	2,3 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Rampa de tensión.	
- Limitación de corriente.	
- Parada suave.	
- Protección frente a sobrecarga del generador.	
- Protección frente a sobretemperatura en tiristores.	
- Protección frente a fallo de fase.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Relé de señalización de fallo.	
- Ajustes potenciométricos.	
- Pilotos de señalización	
- Precio:	537 €

Como se puede observar el 3RW40 proporciona mayores prestaciones que su predecesor, el 3RW30.

Además de contar con un número considerable de protecciones, incluye la función de parada suave y de limitación de corriente. Todas estas características justifican el aumento de precio de este arrancador frente al anterior.

Los ajustes que se pueden llevar a cabo mediante potenciómetros son de tiempo de arranque, tiempo de parada, tensión inicial, limitación de corriente deseada, corriente de empleo de la máquina para establecer la correcta protección de sobrecarga y tipo de sobrecarga (clase 10A, 10, 20, 30). Para realizar la desconexión del aparato y por tanto del sistema se cuenta con un pulsador que genera una interrupción. Mediante los diodos LEDs se indica el posible fallo, el funcionamiento/ desconexión del dispositivo y el puenteo de tiristores.

Este arrancador ofrece la posibilidad de ejecutar un rearranque automático después de una falla cuando se haya anulado ésta. Para el caso de protección de sobrecarga del motor es recomendable no establecer esta función ya que no hay control directo de la temperatura de la máquina.

### Arrancador 3RW44

El arrancador planteado para suavizar el arranque del aerogenerador de la gama SIRIUS 3RW44 de la firma SIEMENS es el 3RW44 26, cuyas características son:

- Fases controladas:	3
- Intensidad nominal:	77 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	230 V CA/ V CC

- Arranques/h:	60
- Sobrecarga máxima:	1,15. $I_n$
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-25°C a 60°C
- Peso:	4,9 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Rampa de tensión.	
- Limitación de corriente.	
- Control de par.	
- Parada suave.	
- Protección frente a sobrecarga del generador.	
- Protección frente a sobretemperatura en tiristores.	
- Protección frente a fallo de fase.	
- Protección frente a desequilibrio de corrientes.	
- Relé de señalización de funcionamiento.	
- Relé de fin de arranque.	
- Relé de señalización de fallo.	
- Display gráfico y 4 teclas.	
- Pilotos de señalización.	
- Precio:	1126 €

El arrancador 3RW44 es el más completo de la marca SIEMENS, debido a su control en tres fases, las protecciones tanto del dispositivo como de la máquina controlada que ofrece y los diferentes modos de funcionamiento que proporciona.

Para esta gama no hay un arrancador intermedio entre el de corriente nominal de 57 A y 77 A. Si escogiéramos el de 57 A tendríamos que limitar la corriente del aerogenerador a esa corriente, por lo cuál no permitiríamos funcionar al aerogenerador a su máxima potencia. En este sentido, se plantea para nuestra aplicación el arrancador de 77 A, elevándose el precio del dispositivo por encima del resto de arrancadores analizados.

Como puede observarse en el listado de características las protecciones que proporciona son las mismas que ofrece el arrancador anterior, con la inclusión de la protección contra desequilibrio de corrientes, la cuál actúa cuando se rebasa un límite establecido que corresponde a la desviación máxima permisible del promedio de las tres corrientes de fase.

Todas las funciones, protecciones y modos de operación pueden gestionarse mediante un Display gráfico y cuatro teclas de selección y navegación. El display además mostrará el estado ,la aparición de fallos y la actuación de protecciones, que también serán señalizados a través de diodos LEDs.

En cuanto a los arranques por hora permitidos para este arrancador, se debe tener en cuenta que la corriente nominal del dispositivo es superior a la corriente de empleo del generador, por lo que para nuestro caso a frecuencia de arranques admisible sería mayor que la mostrada en la lista anterior.

### 3.1.4.3 Arrancadores SCHNEIDER

#### Arrancador Altistar 01

El arrancador de la gama Altistar 01 planteado para nuestra aplicación es el [ATS01N272Q](#), cuyas características son:

- Fases controladas:	2
- Intensidad nominal:	72 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	230 V CA
- Capacidad de arranque:	3.I <sub>n</sub> durante 12 s.
- Arranques/h:	50
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-10°C a 40°C
- Peso:	3,8 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Rampa de tensión.	
- Parada suave.	
- Relé de señalización de fallo.	
- Ajustes potenciométricos.	
- Pilotos de señalización.	
- Precio:	774 €

Este arrancador corresponde a la gama más baja de arrancadores de SCHNEIDER; su control es en dos fases y carece de protecciones. Dispone de una salida de relé que abre en el caso de detectarse un fallo en el dispositivo, que se debe conectar en serie con la bobina de mando del contactor principal, externo al arrancador. El tiempo de arranque ajustable está comprendido entre 1 y 10 s.

No existe un arrancador de esta gama cuya intensidad nominal esté en torno a los 60 A, por lo que se ha escogido el arrancador de intensidad nominal inmediatamente superior a ese valor, que resulta ser 72 A. Esto justifica su coste, más elevado que el de los otros arrancadores de 2 fases planteados.

#### Arrancador Altistar 22

El arrancador de la gama Altistar 22 planteado para nuestra aplicación es el [ATS22D62Q](#), cuyas características son:

- Fases controladas:	3
- Intensidad nominal:	62 A
- Tensión nominal:	400 V CA
- Tensión de alimentación nominal:	230 VA
- Arranques/h:	65

- Capacidad de arranque:	3,5. $I_n$ durante 20 s.
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-10°C a 40°C
- Peso:	7,8 Kg
- Altitud máxima:	1000 m
- Bypass integrado.	
- Rampa de tensión.	
- Limitación de intensidad.	
- Control de par.	
- Parada suave.	
- Protección frente a sobrecarga en generador.	
- Protección frente a sub y sobretensión.	
- Protección frente a sobreintensidad.	
- 1 salida de relé programable.	
- Displays de 7 segmentos.	
- 4 teclas de control.	
- Pilotos de señalización.	
- Precio:	942 €

El arrancador ATS22D62Q presenta mejores características al arrancador anterior en cuanto a que controla una fase más y que dispone de protecciones internas, con una diferencia de precio no muy significativa. Los arranques por hora admisibles y la capacidad de arranque son ligeramente superiores a todos los anteriores arrancadores dado que tiene mayores dimensiones.

Todos los ajustes en cuanto a protecciones y modos de operación se realizan mediante las teclas dispuestas a tal efecto y los displays de 7 segmentos. La protección de sobreintensidad desconecta el sistema con la aparición de una intensidad por encima de la nominal ajustada previamente en un tiempo también prestablecido, de manera que se puede desconectar el equipo antes de que se produzca el disparo de la protección térmica. Para las protecciones de sub y sobretensión también se fijan unos límites de tiempo y de tensión. En cuanto a la salida de relé programable, ésta puede disparar en caso de protección, puenteo realizado, etc.

### Arrancador Altistar 48

El arrancador de la gama Altistar 48 planteado para nuestra aplicación es el ATS48D62Q, cuyas características son:

- Fases controladas:	3
- Intensidad nominal:	62 A
- Tensión de control nominal:	400 V CA
- Tensión de control nominal:	230 VA
- Arranques/h:	55
- Capacidad de arranque:	3 $I_n$ durante 23 s.
- Rango de temperatura ambiente admisible:	-10°C a 40°C
- Peso:	8,3 Kg
- Altitud máxima:	1000 m

- Bypass integrado.
- Rampa de tensión.
- Limitación de intensidad.
- Control de par.
- Parada suave.
- Protección frente a sobrecarga en generador.
- Protección frente a sobreintensidad.
- Protección frente a pérdida de fase.
- 1 salida de relé programable.
- Displays de 7 segmentos.
- 4 teclas de control.
- Pilotos de señalización.
- Precio: 999 €

El arrancador Altistar 48 es muy similar al Altistar 22. Al tratarse de un modelo más antiguo es más pesado, tiene menor capacidad de arranque y no incluye bypass interno. Sin embargo posee características que lo diferencian de éste, como son el rearranque automático tras una falla; la medición de la potencia activa y reactiva, factor de potencia y par (necesarios los parámetros de la máquina) y la inclusión varias salidas de relé para indicar la puesta en marcha o la aparición de alarmas y fallos.

#### 3.1.4.4 Arrancador ALLEN-BRADLEY

El arrancador de la gama SMC3 planteado para nuestra aplicación es el 150-C60, cuyas características son:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| - Fases controladas:                               | 3                 |
| - Intensidad nominal:                              | 60 A              |
| - Tensión nominal:                                 | 400 V CA          |
| - Tensión de control nominal:                      | 240 V AC/ 24 V CC |
| - Arranques/h:                                     | 90                |
| - Rango de temperatura ambiente admisible:         | -5 °C a 50 °C     |
| - Peso:  | 2,25 Kg           |
| - Altitud máxima:                                  | 2000 m            |
| - Bypass integrado.                                |                   |
| - Rampa de tensión.                                |                   |
| - Limitación de intensidad.                        |                   |
| - Parada suave.                                    |                   |
| - Protección frente a sobrecarga en generador.     |                   |
| - Protección frente a sobrecarga en tiristores.    |                   |
| - Protección frente a inversión de fases.          |                   |
| - Protección frente a pérdida de fase.             |                   |
| - Protección frente a desequilibrio de corrientes. |                   |

- Protección frente a dV/dt.
- Desconexión por tiristores cortocircuitados.
- Relé de fallo.
- Relé de fin de arranque.
- 1 potenciómetro de control.
- Microinterruptores
- 1 piloto de señalización.
- Precio: 781 €

El arrancador SMC-3 de ALLEN-BRADLEY presenta características muy interesantes. Por un lado el número de fases que se controlan es de 3, ofrece unas cuantas protecciones, es muy compacto y la programación previa a la puesta en marcha es muy sencilla. Por otro lado también cabe resaltar la gran cantidad de arranques por hora permitidos por el graduador. Ésta es debida a la existencia de un ventilador incorporado en el dispositivo que refrigerará el circuito de potencia. Asimismo se dispone de relés para indicación de fallo y de final de arranque, elementos que interesan para el sistema eólico objeto de este proyecto.

En lo que se refiere a las protecciones, tras haberse extinguido el fallo que ha desconectado el sistema, el dispositivo vuelve a realizar un arranque automáticamente. En el caso de las protecciones frente a sobrecarga el dispositivo retrasa el tiempo necesario el rearreglo para permitir el enfriamiento adecuado de los componentes. Este arrancador dispone de protección frente a dV/dt, es decir, dispone de una red snubber en paralelo con los tiristores que suaviza la conmutación de la tensión en bornes de los tiristores para evitar disparos indeseados.

En definitiva, este arrancador reúne unas características muy favorables por un precio más que asequible.

### 3.1.4.5 Arrancador PETER ELECTRONIC

El arrancador de la firma PETER ELECTRONIC analizado para su posible inclusión en el aerogenerador es el VMX-62-BP, cuyas características son:

- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| - Fases controladas:                       | 3                               |
| - Intensidad nominal:                      | 62 A                            |
| - Tensión nominal:                         | 400 V CA                        |
| - Tensión de control nominal:              | 240 VA                          |
| - Capacidad de arranque:                   | 3,5.I <sub>n</sub> durante 30 s |
| - Arranques/h:                             | 3                               |
| - Rango de temperatura ambiente admisible: | -10°C a 50°C                    |
| - Peso:                                    | 10,4 Kg                         |
| - Altitud máxima:                          | 1000 m                          |
| - Bypass integrado.                        |                                 |
| - Rampa de tensión.                        |                                 |
| - Limitación de intensidad.                |                                 |

- Control de par de arranque.
- Parada suave.
- Protección frente a sobrecarga en generador.
- Protección frente a sobrecarga en tiristores.
- Protección frente a cortocircuito.
- Protección frente a pérdida de fase.
- Protección frente a desequilibrio de corrientes.
- Protección frente a inversión de fases.
- Protección frente a dV/dt.
- Desconexión por tiristores cortocircuitados.
- Desconexión por fallo en bypass.
- 3 relés programables.
- Teclado táctil.
- Displays de 7 segmentos.
- Precio: 900 €

Nos encontramos ante un arrancador de grandes dimensiones que ofrece un gran número de protecciones y de funciones, realizando un control de las tres fases del motor. A pesar de estas ventajosas características, sus grandes dimensiones lo convierten en una opción poco adecuada. Por otro lado el propio dispositivo limita los arranques permitidos por hora a 3, lo cual resulta insuficiente para nuestra aplicación.

### 3.1.4.6 Arrancadores FAIRFORD ELECTRONICS

#### Arrancador XFE

Se han planteado dos arrancadores de esta gama de FAIRFORD ELECTRONICS, que serán analizados a continuación.

#### XFE 122

Las características más relevantes de este arrancador se recogen en la siguiente lista:

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| - Fases controladas:                       | 3                             |
| - Intensidad nominal:                      | 72 A                          |
| - Tensión nominal:                         | 400 V CA                      |
| - Tensión de control nominal:              | 230 VA                        |
| - Capacidad de arranque:                   | 3.I <sub>n</sub> durante 23 s |
| - Arranques/h:                             | 40                            |
| - Rango de temperatura ambiente admisible: | 0°C a 40°C                    |
| - Peso:                                    | 7,3 Kg                        |
| - Altitud máxima:                          | 1000 m                        |
| - Rampa de tensión.                        |                               |
| - Limitación de intensidad.                |                               |

- Control de par de arranque.
- Parada suave.
- Protección frente a sobrecarga en generador.
- Protección frente a sobrecarga en tiristores.
- Protección frente a sobreintensidad.
- Protección frente a pérdida de fase.
- Desconexión por tiristores cortocircuitados.
- Desconexión por fallo en bypass.
- Relé fin de arranque.
- Relé de fallo.
- Pantalla LCD
- 6 teclas.
- Precio: 875 €

Este dispositivo arrancador resulta ser una alternativa interesante, ya que controla las 3 fases de la máquina durante el arranque e incluye varias protecciones, aunque menos que otros arrancadores ya analizados. Además, el arrancador XFE es robusto y pesado, que permite un considerable nivel de sobrecarga durante el arranque. Por otro lado presenta la desventaja de no tener incorporado un contactor de puenteo, siendo necesario conectarlo de manera externa.

### XFE 126

El XFE 126 posee las mismas características que el anterior arrancador al pertenecer a la misma gama que éste, exceptuando las siguientes:

- Corriente nominal: 70 A
- Peso: 8,3 Kg
- funcionamiento con optimización de la energía.
- Precio: 1073 €

Con este arrancador se plantea la posibilidad de funcionamiento continuo del aparato, con el fin de aplicar la función de ahorro energético. Esta función consiste en proporcionarle al generador una tensión eficaz menor para cargas bajas que la tensión de red para disminuir el consumo de energía reactiva, tal y como anteriormente se ha explicado. El inconveniente de esta función radica en que se introducen, durante todo el ciclo de operación del aerogenerador, armónicos de corriente al generador, siempre y cuando la velocidad de viento sea baja. Consecuentemente se producen pérdidas de potencia y calentamiento de los bobinados de estator, lo que hace incierto al supuesto ahorro energético. Asimismo se introducen armónicos de corriente en la red que no resultan beneficiosos ya que generan pérdidas en las líneas de potencia y perturban la estabilidad de la red.

La corriente nominal de este dispositivo debe ser mayor que el anterior ya que opera de manera continua y el calentamiento generado en los tiristores de potencia es mayor para una misma corriente de empelo de la máquina. Por este motivo el coste de este arrancador es significativamente superior que el de otros ya estudiados, razón por la cual esta opción resulta poco interesante

Arrancador	ABB PSR	ABB PSE	ABB PSS	ABB PSTB
Fases controladas	2.	2.	3.	3.
Bypass integrado	Sí.	Sí.	Sí.	Sí.
Relé fin de rampa	Sí.	Sí.	No.	Sí.
Arranques/h	10.	10.	30.	30.
Protección	-No incluye	-Sobrecarga.  -Fallo de fase.  -Sobretemperatura en tiristores.  -Fallo de Bypass.	-No incluye	-Sobrecarga.  -Sobretemperatura en tiristores.  -Desequilibrio de corrientes.  -Inversión de fases.  -Cortocircuito en tiristores.  -Sobreintensidad.  -Fallo de fase.  -Frecuencia fuera de rango.
Interfaz	-Controles potenciométricos.  -LEDs de standby y de bypass.	-Pantalla retroiluminada.  -Teclado 4 teclas.  -LEDs de fallo, de estado y de bypass.	-Controles potenciométricos.  -LEDs indicadores de fallo, estado y bypass.	-Pantalla LCD  -Teclado 4 teclas.  -LEDs de estado, fallo y protección.
Otras características	-Arrancador compacto; ocupa poco espacio.  -Manejo sencillo.  -Parada suave	-Salida analógica indicadora de intensidad.  -Rampa de tensión con limitación de intensidad (trafo externo).  -Modo de funcionamiento con control de par.  -Desconexión para fallo de software.  -Parada suave.	-Rampa de tensión con limitación de intensidad (trafo externo).  -Parada suave.	- Salida analógica indicadora de tensión, intensidad y factor de potencia.  -Rampa de tensión con limitación de intensidad.  -Modo de funcionamiento con control de par.  -Desconexión para bypass abierto y fallo de software.  -Parada suave.
Precio (€)	356	600	474	882

Arrancador	Siemens 3RW30	Siemens 3RW40	Siemens 3RW44
Fases controladas	2	2	3
Bypass integrado	Sí.	Sí.	Sí.
Relé fin de rampa	No.	Sí.	Sí.
Arranques/h	17.	17.	60.
Protección	-No incluye.	-Sobrecarga Motor. -Sobrecalentamiento tiristores. -Fallo de fase.	-Sobrecarga Motor. -Sobrecalentamiento tiristores. -Sobretensión. -Fallo de fase. -Desequilibrio de corrientes (límite).
Interfaz	-Ajustes potenciométricos. -LEDs indicadores de encendido, estado y fallo.	-Ajustes potenciométricos. -LEDs indicadores de encendido, estado, fallo y sobrecarga.	-4 teclas de control. -Display gráfico donde se indican fallos, alarmas y estado, y se establecen los modos de funcionamiento.
Otras características	-Compacto, idóneo para armarios de potencia de pequeño tamaño. -Manejo sencillo. -Salida de relé de estado (funcionamiento/paro) para asegurar la desconexión.	- Rampa de tensión con limitación de intensidad. -Parada suave. -Relé de estado (funcionamiento/paro) de seguridad. -Rearranque automático <sup>6)</sup> .	- Rampa de tensión con limitación de intensidad. -Modo de funcionamiento con control de par. -Parada suave. -4 salidas de relé programables (encendido, marcha...). -Rearranque automático.
Precio (€)	413	537	926

Arrancador	Schneider Altistar 01	Schneider Altistar 22	Schneider Altistar 48
			
Fases controladas	2	3	3
Bypass integrado	Sí.	Sí.	No.
Relé fin de rampa	Sí.	Sí.	Sí.
Arranques/h	50.	65.	55.
Protección	-Disponible una salida de relé de fallo para abrir el contactor de alimentación.	-Sobrecarga Motor. -Sobretensión. -Subtensión. -Sobreintensidad. -Fallo de fase.	-Sobrecarga del motor. -Sobreintensidad. -Fallo de fase.
Interfaz	-Ajustes potenciométricos. -LEDs indicadores de alimentación y de bypass.	-4 teclas de control. -LEDs indicadores de alimentación, bypass y fallo. -3 Displays 7 segmentos.	-4 teclas de control. -3 Displays 7 segmentos.
Otras características	-Compacto. -Manejo sencillo. -Parada suave. -Salida de relé de estado (funcionamiento/paro) para asegurar la desconexión.	- Rampa de tensión con limitación de intensidad. -Control de par. - Parada suave. -1 salida de relé programable (paro, bypass, fallo). -Visualización de los estados del generador y del arrancador.	- Rampa de tensión con limitación de intensidad. -Control de par. -Parada suave. -3 Salidas de relé, 2 salidas lógicas y 1 salida analógica. -Representación visual del estado térmico, fdp, corriente, par, potencia activa y estado del motor. -Rearranque automático.
Precio (€)	774	942	999

Arrancador	Allen Bradley SMC-3	Peter electronic VMX	Fairford Electronics XFE 122	Fairford Electronics XFE 126
Fases controladas	3	3	3	3
Bypass integrado	Sí.	Sí.	No.	No.
Relé fin de rampa	Sí.	Sí.	Sí.	Sí.
Arranques/h	90.	3.	40.	40.
Protección	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobrexcarga.</li> <li>- Sobretemperatura en tiristores.</li> <li>- Inversión de fases.</li> <li>- Desequilibrio de corrientes.</li> <li>- Tiristores cortocircuitados.</li> <li>- Fallo de fase.</li> <li>- dV/dt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrexcarga.</li> <li>-Cortocircuitos.</li> <li>-Sobretemperatura en tiristores.</li> <li>-Fallo de bypass.</li> <li>-Cortocircuito tiristores.</li> <li>-Desequilibrio de corrientes.</li> <li>-Fallo de fase.</li> <li>-dV/dt.</li> <li>-Inversión de fases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrexcarga.</li> <li>-Tiristores cortocircuitados.</li> <li>-Sobretemperatura.</li> <li>-Fallo de fase.</li> <li>-Fallo de bypass.</li> <li>-Sobreintensidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mismas protecciones que XFE 122.</li> </ul>
Interfaz	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Control potenciométrico.</li> <li>-interruptores para selección de parámetro a ajustar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teclado táctil.</li> <li>-LEDs indicadores De estado y de fallo.</li> <li>-Displays LED 7 segmentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Teclado 6 botones.</li> <li>-Pantalla LCD.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Teclado 6 botones.</li> <li>-Pantalla LCD.</li> </ul>
Otras características	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rampa de tensión con limitación de intensidad.</li> <li>-Parada suave.</li> <li>-Rearranque automático tras alarma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rampa de tensión con limitación de intensidad.</li> <li>-Control de par.</li> <li>-Parada suave.</li> <li>-Rearranque automático después de fallo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rampa de tensión con limitación de intensidad.</li> <li>-Parada suave.</li> <li>-Relés programables (alarma, marcha, sobrecarga...).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rampa de tensión con limitación de intensidad.</li> <li>-Parada suave.</li> <li>-Modo de optimización de energía con funcionamiento continuo del dispositivo.</li> </ul>
Precio (€)	781	900	874	1073

### 3.1.5 Compensación de energía reactiva

Los inductores de estator de la máquina asincrónica precisan de una energía para generar el campo magnético en el entrehierro. Dicha energía, denominada energía reactiva, no es consumida porque se devuelve a la red, debido a la autoinducción que presentan las inductancias. Por tanto, no es una energía que se consuma ya que no genera movimiento ni se disipa en forma de calor. En un principio puede parecer que el consumo de energía reactiva de las máquinas asíncronas no presente pérdidas de potencia, ya que ésta es devuelta a la red, sin embargo para poderse establecer el campo magnético es necesaria la circulación de una corriente cuyo valor eficaz es mayor que la de otra corriente que circulara por un circuito que consumiera la misma potencia aprovechable, llamada potencia activa. Este aumento de corriente implica una disipación de potencia mayor en las líneas de potencia comprendidas entre la fuente generadora y la máquina en cuestión, lo que resulta un gran inconveniente para las empresas distribuidoras de energía eléctrica. Asimismo se producen pérdidas de potencia por efecto *Joule* en los cables que conectan la máquina con el punto de conexión de la red.

Para una mejor comprensión de todos estos conceptos haremos un pequeño análisis de la potencia en una carga con excitación sinusoidal de tensión. En primer lugar, definimos lo que es la potencia instantánea en una carga. Ésta es el producto de la onda de corriente y de la onda de tensión en la carga:

$$P(t) = u(t) \cdot i(t)$$

[Ec.3.6]

La potencia instantánea se divide en dos componentes, la componente activa y la componente reactiva. La componente activa corresponde a la potencia en la componente resistiva de la carga, mientras que la componente reactiva corresponde a la potencia en la componente capacitiva o inductiva.

La componente activa tiene como valor medio el resultado de la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P_R(t) \cdot dt = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi)$$

[Ec.3.7]

Donde  $T$  es el período de la onda de tensión,  $P_R(t)$  la potencia en la componente resistiva,  $U_{ef}$  y  $I_{ef}$  son los valores eficaces de las ondas de tensión y corriente respectivamente y  $\varphi$  corresponde al desfase entre la tensión y la corriente en la carga. Éste valor medio nos da una idea de cual es la potencia que puede ser transformada en otro tipo de energía (calor, movimiento...), y corresponde a la denominada potencia activa.

Por otro lado, se tiene que la componente reactiva tiene valor medio nulo. Esto indica que esta componente no disipa potencia puesto que la que recibe es devuelta a la red.

La amplitud de la onda de potencia, comúnmente llamada potencia reactiva, de la componente reactiva coincide con la siguiente expresión:

$$Q = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \operatorname{sen}(\varphi)$$

[Ec.3.8]

Como podemos observar, tanto la potencia activa como la potencia reactiva están relacionadas por el producto de la tensión eficaz y la corriente eficaz. Por este motivo se define la potencia aparente, que resulta ser ese producto.

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef}$$

[Ec.3.9]

Atendiendo a las ecuaciones 3.8 y 3.9, se pueden relacionar la potencia activa y reactiva como se muestra en la siguiente expresión:

$$\frac{P}{Q} = \operatorname{cot} \varphi$$

[Ec.3.10]

Dada la relación trigonométrica de estas tres potencias definidas, se pueden representar en un triángulo rectángulo llamado *triángulo de potencias*.

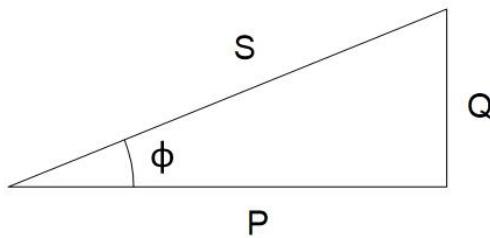


Figura 3.6. Triángulo de potencias en una carga.

Como podemos observar en la figura, para una misma potencia activa, que es la que realmente puede ser aprovechada, la potencia aparente puede tener un valor u otro en función de la potencia reactiva. La potencia reactiva en nuestro caso corresponde a la necesaria para que se establezca el campo magnético giratorio en el entrehierro de la máquina. Cuanto menor sea la potencia reactiva absorbida por la carga menor será la potencia aparente, por tanto menor la corriente que circula a través de la carga, ya que la tensión permanece fija al estar alimentada la carga por una fuente de tensión independiente. Otro parámetro que se suele definir es el factor de potencia, que corresponde al coseno del ángulo de desfase entre tensión y corriente,  $\varphi$ . Cuanto más próximo este a la unidad, la potencia activa es más similar a la potencia aparente, de forma que la intensidad absorbida es en su mayor parte aprovechada para ser transformada en movimiento o en calor, dependiendo de la aplicación.

Por este motivo resultaría interesante conectar un dispositivo a la carga, en nuestro caso al generador, que supliera parte o la totalidad de la energía reactiva requerida por ésta, con el fin de reducir la corriente absorbida y así evitar las pérdidas de potencia anteriormente comentadas. Las entidades distribuidoras de energía eléctrica de carácter estatal ofrecen una recompensación económica que depende de la cantidad de energía reactiva consumida de la red, de manera que cuanto menor sea este consumo mayor será la bonificación.

En el caso de las máquinas asíncronas, el factor de potencia depende de la carga acoplada en el eje del rotor, de manera que cuanto menor es ésta menor resulta ser el factor de potencia. Esto es debido a que para cargas bajas el deslizamiento es menor que para cargas altas, de forma que la impedancia en la rama de rotor del circuito equivalente de la máquina resulta mayor.

La impedancia equivalente resultado de la rama de magnetización y de la rama de rotor conectadas en paralelo es más similar al valor de la rama de magnetización en esta situación, cuya componente inductiva es elevada. Por consiguiente el valor del factor de potencia es menor al presentarse una carga con mayor componente inductiva. Aunque el factor de potencia disminuye considerablemente al reducirse la carga, no se produce un aumento de energía reactiva, ya que la potencia activa necesaria para mover cargas bajas es función del bajo par resistente que ofrecen. En la figura 3.7 se muestran dos triángulos de potencia cuyos valores de potencia activa y de ángulo  $\phi$  difieren pero el valor de energía reactiva es distinto.

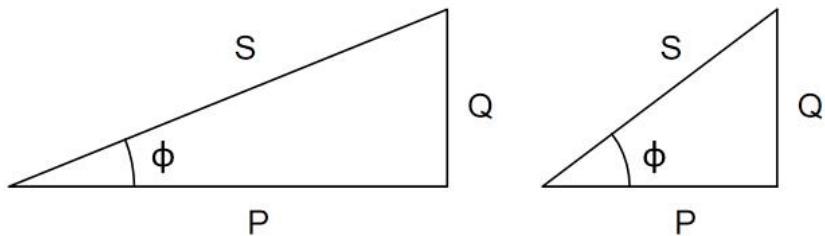


Figura 3.7. Triángulos de potencia para distintos regímenes de carga.

En vista de tal situación, se puede decir que la energía reactiva consumida en todo el régimen de carga de una máquina asíncrona no varía significativamente. A esta conclusión también se puede llegar teniendo en cuenta que la energía necesaria de magnetización no depende del deslizamiento. Sin embargo, la energía reactiva consumida no es constante y aumenta ligeramente en función del régimen de la carga, tal y como puede observarse en la siguiente gráfica, donde se aprecia que el la disminución de factor de potencia es más pronunciada que la reducción de la energía reactiva.

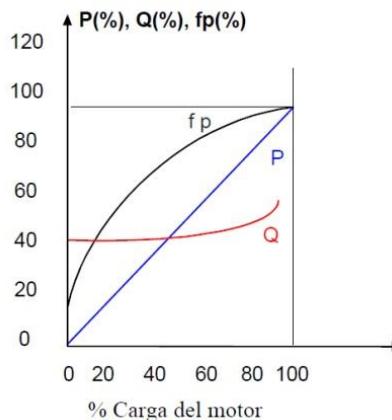


Figura 3.8. Curvas de energía activa, reactiva y fdp en una máquina asincrónica.

Teniendo en cuenta todos estos conceptos se ha realizado un análisis de las posibles alternativas para compensar la energía reactiva que solicita la máquina, siendo algunos más simples y económicos y otros de mayor complejidad y coste.

### 3.1.5.1 Baterías de condensadores

Las baterías de condensadores son los elementos más sencillos y económicos que suministran energía reactiva a las máquinas asincrónas. Éstas son trifásicas y se conectan en paralelo con los devanados de estator. De esta forma se consigue que la energía reactiva circule entre los condensadores y los devanados de carácter inductivo, transfiriéndose potencia desde los condensadores, que almacenan energía en su campo eléctrico, hasta los devanados inductores, que almacenan energía en su campo magnético, y viceversa.

Las baterías de condensadores, al ser trifásicas, pueden estar conectadas en estrella o en triángulo. En una batería en estrella, por cada fase de ésta circula mayor corriente que por las fases de una batería en triángulo para la misma potencia reactiva. La tensión en bornes de cada condensador para la conexión en estrella es la de fase de la red, la de las fases de una batería en triángulo es la de línea de la red. Por este motivo, para una misma potencia la corriente en cada fase de la batería en estrella es  $\sqrt{3}$  veces superior a la corriente por cada fase en la batería en triángulo. Cuanto mayor sea la corriente a soportar por cada condensador mayores son las pérdidas por efecto Joule, por lo que se requiere más cantidad de material conductor para reducir pérdidas, encareciéndose de esta manera el coste del producto. En este sentido, las baterías en triángulo resultan más económicas que las baterías en estrella, por lo que las baterías planteadas para compensación de reactiva en nuestra aplicación serán con conexión en triángulo.

Existe la posibilidad para la compensación de conectar un *banco fijo* de condensadores en bornes con el estator de la máquina, de una potencia reactiva fija.

Como anteriormente se ha comentado, la potencia reactiva requerida por la máquina no varía en gran medida con respecto al régimen de carga.

Por ello una compensación individual puede servir, aunque se consuma algo más de reactiva para altas cargas de la máquina. Para este tipo de compensación se escoge un banco de condensadores que no compensa toda la energía reactiva para plena carga, ya que en caso contrario para cargas bajas puede darse el caso de que el conjunto batería-máquina trabaje con factor de potencia capacitivo, lo que conlleva a una circulación de corriente por las líneas de potencia desfasada con la tensión que genera pérdidas.

Por otro lado, la compensación puede realizarse mediante *baterías automáticas* de condensadores, las cuáles presentan varios bancos de condensadores, denominados escalones, que se conectan en función de la carga que experimente la máquina. De este modo, para cargas altas de la máquina habrá más escalones conectados que para cargas bajas, lo que implica que se pueda compensar la reactiva de manera óptima para todo el régimen de carga. Las baterías automáticas controlan el factor de potencia mediante los sensores oportunos, de manera que si, trabajando la máquina con baja carga, se produce un aumento de carga y el factor de potencia disminuye automáticamente se conecta otro escalón para aumentar la cesión de reactiva por parte del equipo. Por en contrario, si trabajando a plena carga se produce una disminución de ésta y en consecuencia disminuye el requerimiento de reactiva, se desconectan los escalones necesarios.

Una batería de condensadores automática resulta, como es lógico, menos económica que un banco fijo de condensadores. Para nuestra aplicación van a plantearse dos posibilidades de compensación para una conexión directa a la red del aerogenerador y operando a dos velocidades, merced a los dos generadores disponibles.

En primer lugar deberemos calcular cuales son los requerimientos de potencia reactiva para plena carga de cada generador, conocidos los factores de potencia a plena carga de cada uno.

En lo que respecta al G1, este factor de potencia es  $\cos \varphi = 0,85$ , por lo tanto la potencia reactiva requerida será:

$$Q_1 = P_{n1} \cdot \tan(\arccos(0,85)) = 7,5 \cdot 0,62 = 4,65 \text{ Kvar}$$

En cuanto a G2, el factor de potencia nominal es  $\cos \varphi = 0,87$ , entonces la potencia reactiva requerida por éste será:

$$Q_2 = P_{n2} \cdot \tan(\arccos(0,87)) = 30 \cdot 0,567 = 17 \text{ Kvar}$$

El siguiente paso es plantear el factor de potencia del conjunto batería-generador deseado. Para ello tendremos en cuenta que según el *Real Decreto 661/2007*, se percibe bonificación cuando la instalación presenta un factor de potencia superior o igual a 0,95, por tanto establecemos un factor de potencia deseado para la potencia nominal superior a ese valor.

Por consiguiente el valor de potencia reactiva absorbida por G1 de la red será:

$$Q_{1red} = P_{n1} \cdot \tan(\arccos(0,98)) = 7,5 \cdot 0,203 = 1,523 \text{ kVAr}$$

Y el valor de potencia reactiva absorbida por G2:

$$Q_{1red} = P_{n2} \cdot \tan(\arccos(0,98)) = 30 \cdot 0,203 = 6,09 \text{ kVAr}$$

En estas condiciones se necesita inyectar en G1 una potencia reactiva de  $Q_{i1} = 3,125 \text{ kVAr}$  y en G2 una potencia reactiva de  $Q_{i2} = 10,91 \text{ kVAr}$ , para elevar el factor de potencia en condiciones nominales a 0,98.

De acuerdo con estos resultados, por un lado se plantea la posibilidad de instalar dos bancos fijos de condensadores, uno por cada generador, cuyas potencias reactivas sean similares a las que se acaban de calcular. Estos bancos serán conectados a los generadores mediante contactores en función de si está operando o no el generador al que está conectado cada uno.

Por otro lado se presenta la alternativa de utilizar una batería automática, que posea al menos dos escalones, conectándose uno de ellos durante la operación de G1 y los dos cuando esté en funcionamiento G2.

Para llevar a cabo el primer método se ha planteado dos bancos de condensadores fijos de la firma SIEMENS. El encargado de compensar la energía reactiva de G1 es de 2,5 kVAr para una tensión de 380 V trifásica, un valor menor al anteriormente calculado. Con este banco fijo se obtendría un factor de potencia en condiciones nominales de 0,961. El banco fijo que compensaría a G2 elegido es de 10 kVAr para 380 V, y con él se obtiene un factor de potencia en condiciones nominales de 0,974. Ambos bancos están provistos de resistencias de descarga. Para la protección frente a cortocircuitos se establecerían fusibles de alto poder de ruptura de la firma SIBA y para la commutación de las baterías se utilizarían contactores especiales para condensadores de SIEMENS.

El segundo método planteado de compensación se realizaría mediante una batería automática de 12,5 kVAr de la firma SIEMENS, provista de 3 escalones, uno de 2,5 kVAr y los otros dos de 5 kVAr. Esta batería está equipada con fusibles de alto poder de ruptura, contactores especiales para condensadores y resistencias de descarga. A continuación se muestran dos tablas donde se recoge el coste de aplicar cada uno de los dos métodos.

Componentes	Precio (€)
<b>Banco fijo 1</b>	174,77
<b>Banco fijo 2</b>	230,34
<b>2 contactores</b>	77,04
<b>6 fusibles</b>	35,22
<b>Total</b>	517,37

Tabla 3.1. Costes de la compensación de reactiva con bancos fijos.

Componentes	Precio (€)
Batería automática	1351
<b>Total</b>	<b>1351</b>

Tabla 3.2. Costes de la compensación de reactiva con batería automática.

Como se puede apreciar en las tablas, la compensación mediante bancos fijos conlleva un gasto económico muy inferior al que supone la compensación mediante batería automática. Por esta razón se ha elegido el primer método, teniendo en cuenta uno de los objetivos principales del presente proyecto.

### 3.1.5.2 SVC (Static Voltage Compensator)

Los dispositivos SVC consisten en bancos de condensadores conmutados por interruptores estáticos, es decir, por interruptores electrónicos, y son especialmente utilizados para compensar la energía reactiva consumida por una carga y para mantener la tensión en bornes de esa carga estable. Los interruptores electrónicos, que normalmente son tiristores, conmutan a una frecuencia elevada y con un ciclo de servicio que depende de la impedancia que presente la carga en cada momento, para conseguir que la capacidad efectiva del banco sea la idónea para compensar toda la energía reactiva que la carga solicita. Por tanto, el factor de potencia se mantiene siempre en un valor cercano a la unidad.

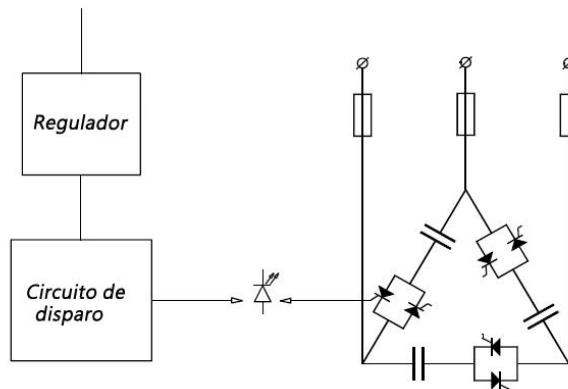


Figura 3.9. SVC controlado por tiristores.

Estos dispositivos están formados por un regulador de respuesta rápida, un circuito electrónico de control que realiza los impulsos necesarios para disparar los tiristores y por tres pares de tiristores conectados en antiparalelo, uno por cada fase, y tres condensadores, conectados cada uno en serie con una pareja de tiristores. Los SVC tienen la capacidad de mantener la tensión en bornes de una carga constante, ya que si una carga es inductiva, la capacidad efectiva que se establece es de tal manera que compensa la caída de tensión producida por esa carga.

La no existencia de fluctuaciones de tensión es beneficiosa para equipos sensibles a las variaciones de tensión, como por ejemplo un PLC, equipo que forma parte de nuestra aplicación. Por otro lado, los tiristores son disparados en el cruce por cero de la tensión, lo que evita la aparición de altas corrientes transitorias si se expone un condensador a un nivel de tensión considerable, las cuales producen un deterioro prematuro de los condensadores.

Otra de las grandes ventajas de estos dispositivos es su velocidad de reacción, puesto que al no existir transitorios en la conexión, las variaciones de tensión en la carga son compensadas en un breve lapso de tiempo. Asimismo estos equipos no necesitan ningún mantenimiento a diferencia de los contactores mecánicos utilizados en baterías de condensadores fijas y automáticas.

Esto es debido a que sus contactos se deterioran en gran medida en cada transitorio de conexión y tienen un número de maniobras limitado. Una vez traspasado este límite, los contactos de los contactores deben ser remplazados, con el consiguiente coste del material y de la mano de obra.

En cuanto a los inconvenientes que se presentan cuando se utilizan estos dispositivos, hay que tener en cuenta la disipación de potencia en los elementos semiconductores, lo que implica una disminución del rendimiento. Para evitar el excesivo calentamiento de los tiristores debido a esta disipación de potencia, los semiconductores deben estar equipados con radiadores que evacúen convenientemente el calor. Por otra parte el coste que presentan estos dispositivos es elevado, ya que el material semiconductor es de alto precio. Una batería de condensadores conmutada por interruptores estáticos puede llegar a costar el doble de lo que cuesta una batería automática de condensadores para la misma aplicación, así que esta alternativa se descarta para la compensación de reactiva de los generadores del sistema eólico debido al presupuesto limitado del que se parte.

### 3.2 Regulación a velocidad variable

La conexión indirecta a la red de un aerogenerador consiste en intercalar entre el generador o los generadores de éste y el punto de conexión a red de un variador de frecuencia electrónico, generalmente con una configuración denominada “back-to-back” con puentes de transistores IGBTs totalmente controlados, los cuales resultan ser una combinación de los transistores MOSFET y los bipolares. Este tipo de equipos electrónicos rectifican la corriente alterna que se establece en la entrada del dispositivo en corriente continua, mediante un puente rectificador. La tensión continua resultado de la rectificación es filtrada mediante un condensador y posteriormente es invertida en corriente alterna mediante un puente inversor. Las ondas de salida de corriente alterna de estos convertidores son de tipo rectangular, lo cual implica presencia de armónicos en esas ondas. Dado que en una máquina asíncrona la velocidad de sincronismo depende de la frecuencia de las ondas de alimentación, al variar ésta obtenemos una variación en la velocidad de sincronismo, y por tanto en el rotor de la máquina ya que éste siempre trabaja a velocidades cercanas a la de sincronismo.

Por tanto, variando la frecuencia de las ondas de tensión en el estator conseguimos una velocidad variable en el generador y por consiguiente en la turbina eólica. Dicha frecuencia es modulada por mediación del puente inversor de los convertidores. La frecuencia de la onda de salida depende de la frecuencia de conmutación de los tiristores de este puente. Hay que tener en cuenta que la relación tensión-frecuencia debe ser constante para mantener las condiciones magnéticas necesarias de flujo de la máquina.

Si la frecuencia disminuyera y la tensión de estator permaneciera constante, el flujo magnético inducido en la máquina alcanzaría valores inadmisibles. Por lo tanto la frecuencia debe variar de manera proporcional con la tensión de excitación del estator. La variación de tensión se produce mediante el puente rectificador del variador cuando se produce una variación de frecuencia en el inversor. Por mediación de éste se consigue una variación de tensión en el bus de continua y consecuentemente variación de tensión en bornes del estator.

Los sistemas eólicos de velocidad variable de estas características poseen la ventaja de producir arranques de los generadores a corrientes reducidas, compensar la energía reactiva requerida por éstos y de evitar desconexiones de la red frente a un hueco de tensión con un solo dispositivo, el convertidor de frecuencia. Además, la obtención de potencia eléctrica aumenta con respecto a los aerogeneradores de velocidad fija, como ya se comentó en el capítulo 2.

Durante el arranque, estos dispositivos disminuyen la tensión eficaz de excitación del estator, tal y como lo hacen los arrancadores estáticos, con la diferencia de que la frecuencia en los convertidores también es disminuida. Si la tensión de los devanados estatóricos no es muy elevada la corriente de magnetización que absorben tampoco lo es. Un convertidor de frecuencia tipo "back-to-back", cuyos dos puentes están formados por interruptores totalmente controlados, es capaz de controlar la potencia activa y reactiva tanto en funcionamiento de la máquina como motor como en operación como generador. Mediante la variación de la tensión y la frecuencia del generador eólico se puede limitar la potencia eléctrica generada y mejorar el factor de potencia de ésta. En el funcionamiento como generador, La potencia reactiva se regula variando el módulo de la tensión de la salida del puente rectificador, de manera que si éste es menor que el módulo de la f.e.m. del generador, éste genera potencia reactiva. La potencia activa que se transfiere al bus de continua depende del desfase entre la f.e.m. del generador y la tensión del convertidor, de manera que si la primera está retrasada con respecto a la segunda, la potencia se transfiere del generador al convertidor, produciéndose generación eléctrica por parte del generador.

Por otro lado estos dispositivos permiten que el aerogenerador tenga un buen comportamiento con respecto a huecos de tensión, ya que ante la presencia de éstos el bus de continua sigue alimentando al generador, con lo cuál, si el hueco de tensión no es muy alargado, no se produce desconexión y bloqueo del sistema por riesgo a que se embale el rotor. Asimismo, dada la posibilidad de controlar la dirección de la potencia reactiva que proporcionan los convertidores, ante un hueco de tensión el convertidor posibilita que se genere energía reactiva que solicitan las cargas conectadas a la red.

A continuación se va a exponer un método de control para posibilitar el funcionamiento de un aerogenerador a velocidad variable.

En primer lugar debemos tener en cuenta la expresión de la potencia absorbida por una turbina eólica y la expresión de la velocidad específica, de la cual depende el coeficiente de potencia.

Sustituyendo la expresión de la velocidad de viento, función de la velocidad angular de rotor y la velocidad específica óptimas para esa velocidad de viento, en la expresión de la potencia absorbida, obtenemos que la potencia máxima absorbida posible para esa velocidad de viento es:

$$P_{MAX} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left( \frac{R \cdot \Omega_{opt}}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_{pmax}$$

[Ec.3.7]

Observamos que en esta expresión todos los parámetros son constantes para todas las velocidades de viento a excepción de la velocidad angular óptima.

Con lo cual se demuestra que la potencia máxima aprovechable por una turbina para cada velocidad de viento se produce a una velocidad angular distinta. Como la única variable de la anterior expresión es la velocidad angular óptima, agrupamos los demás parámetros en uno sólo de valor fijo:

$$P_{MAX} = K \cdot \Omega_{opt}^3$$

[Ec. 3.8]

Dividiendo esta expresión por  $\Omega_{opt}$  obtenemos:

$$T_{opt} = K \cdot \Omega_{opt}^2$$

[Ec. 3.9]

Donde  $T_{opt}$  es el par óptimo que experimenta la turbina en condiciones de máxima potencia absorbida. Atendiendo a la anterior expresión, es posible alcanzar la velocidad angular óptima gobernando el par de la turbina. Para realizar el control de par se detecta la velocidad angular en el eje lento, de la cual se obtiene el par de referencia por medio de la expresión 3.8, que se transmite al bucle de control. A partir de la corriente y la tensión presentes en el estator se estima el par real, que se le resta al par de referencia para obtener el error, que se introduce en un regulador que establece los disparos de los transistores del rectificador del convertidor necesarios para generar el par electromagnético de referencia en el rotor del generador y así alcanzar la velocidad de giro óptima. La Potencia activa y la potencia reactiva se regulan en este caso mediante el puente inversor del lado de red.

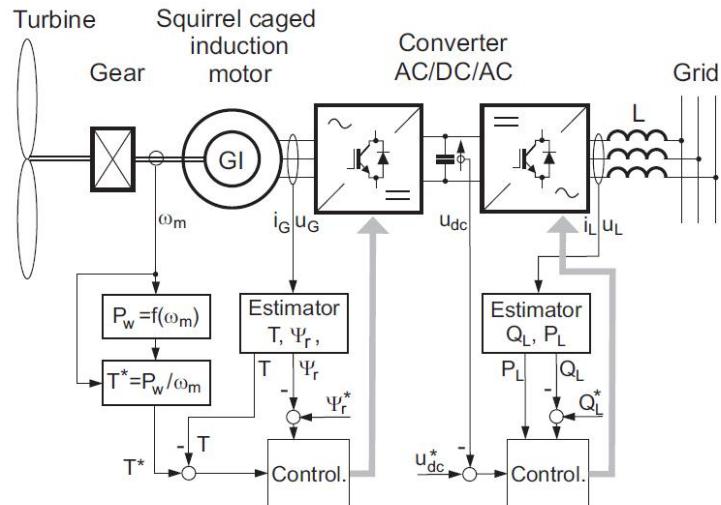


Figura 3.10. Diagrama de control de un aerogenerador operando a velocidad variable.

En vista de las ventajas que aporta el control de los aerogeneradores a velocidad variable, la inclusión de un convertidor de frecuencia en el sistema eólico que se nos presenta resulta una buena alternativa.

El gran inconveniente que se presenta es el coste de estos dispositivos, elevado ya que están compuestos por 12 tiristores IGBTs, cuyo material semiconductor es caro. Seguidamente se muestra una tabla donde se recogen cuatro variadores de velocidad idóneos para el aerogenerador planteado y los costes de éstos.

Convertidor	Intensidad nominal (A)	Precio (€)
<b>Micromaster SIEMENS</b>	75	3097,34
<b>Altivar SCHNEIDER</b>	66	3246
<b>AC5310 ABB</b>	74	2193,24
<b>FR-A740 MITSUBISHI</b>	62	3596

Tabla 3.3. Precios de variadores de frecuencia.

El presupuesto del que se parte para la realización de este proyecto es limitado y la inversión que supone cualquiera de los variadores de frecuencia mostrados en la tabla no se puede abordar, estando sus costes muy por encima del coste que suponen un arrancador estático junto con baterías de condensadores, por lo que se ha descartado la alternativa de operación del aerogenerador a velocidad variable.

## 4 Soluciones finales adoptadas.

En este capítulo se exponen los métodos y los componentes que finalmente se establecen en nuestro aerogenerador para realizar un adecuado control de potencia del sistema y para realizar las protecciones necesarias imprescindibles para una operación del aerogenerador de forma segura tanto para el equipo, la red eléctrica y los seres vivos.

### 4.1 Operación a dos velocidades

El modo de funcionamiento del aerogenerador que nos ocupa consiste en una operación a dos velocidades de rotor eólico. En el capítulo anterior se analizaron las ventajas que aporta este método de operación, que sumadas al hecho de disponer dos máquinas asíncronas de antemano, convierten a esta alternativa en la idónea para la reinstalación del aerogenerador PEUI-10. Las velocidades alcanzadas en la turbina son en concreto 70 y 75 r.p.m. Cada velocidad se alcanza por medio de un generador distinto, de modo que para la velocidad de sincronismo de uno de ellos se alcancen las 70 r.p.m. y para la velocidad de sincronismo del otro 75 r.p.m. Se dispone de dos generadores, uno de potencia nominal de 7,5 KW y el otro de 30 KW, cuyas características se muestran en las tablas de generadores del capítulo 2. Realmente las velocidades alcanzadas en la turbina no son sólo dos, pues como ya se comentó anteriormente la velocidad de una máquina asíncrona varía en todo el régimen de carga, ya que el par de la máquina depende del deslizamiento. Sin embargo esta variación es muy poca con respecto a la velocidad de sincronismo.

Para alcanzarse la velocidad específica óptima para todo el rango de operación de un aerogenerador es necesario que para distintos regímenes de carga la variación de velocidad sea mayor que la que proporciona una máquina asíncrona, por ello se considera que ésta trabajando como aerogenerador funciona a una velocidad constante.

Como ya se vio en el capítulo 2, la velocidad específica para velocidades de viento bajas está más cercana a la velocidad específica óptima que si el aerogenerador operara con un solo generador, es decir, el coeficiente de potencia que se obtiene a estas velocidades es mejor en la operación a dos velocidades que a una. Los generadores disponibles poseen el mismo número de polos, y al estar conectados a la misma red su velocidad de sincronismo es idéntica. Por ello es necesario establecer distinta relación de multiplicación para cada generador con respecto a la turbina, ya que en caso contrario el resultado en cuanto a velocidad de la turbina sería el mismo que en el funcionamiento con un solo generador. Para este cometido se dispone tanto de la caja multiplicadora de la antigua instalación, de relación  $r: 20$ , como de la correa de transmisión que acoplaba el eje del rotor del G1 con el eje del G2, con una relación de multiplicación de 1,071 si consideramos el eje de G2 como eje primario y el de G1 como eje secundario.

El método adoptado para conseguir dos velocidades distintas en la turbina es el siguiente:

La caja multiplicadora se acopla entre la turbina y el generador G2, y la correa de transmisión acoplará mecánicamente al eje de G2 con el eje de G1. En el caso de que la velocidad de viento del emplazamiento donde se encuentre instalado el aerogenerador sea de orden bajo se conecta a la red G1 y G2 permanece desconectado, arrastrándose la inercia de G2. De esta forma se consigue que actuando el G1 a la velocidad de sincronismo se alcance una velocidad en el eje de G2 de 1400 r.p.m., la cuál conduce a la turbina por medio de la caja multiplicadora a girar a una velocidad de 70 r.p.m. Si la velocidad de viento resulta ser considerable se desconecta de la red G1 y se conecta G2, que a su velocidad de sincronismo, 1500 r.p.m., la velocidad obtenida en la turbina es de 75 r.p.m.

La conexión a red del aerogenerador se producirá mediante un arrancador estático o graduador, con el que se consigue una absorción de corriente durante el arranque de la máquina moderada y se evitan oscilaciones de par excesivas. Cuando la velocidad de viento sea suficiente, se dará la orden de conexión de G1 al arrancador mediante un contactor y éste comenzará el arranque suave. Una vez terminada la rampa de tensión que experimenta el generador durante el arranque, se conectarán un banco de condensadores mediante un contactor que proporcione energía reactiva, evitándose así una absorción excesiva de ésta de la red. Si la velocidad de viento asciende por encima de un cierto valor, se desconectarán G1 y la batería de condensadores para dar paso al funcionamiento de G2, acoplándose al arrancador mediante un contactor y conectándose a la red de manera paulatina por medio del arrancador suave. Finalizado el arranque se procederá a la conexión de la batería de condensadores de compensación de reactiva del generador G2. En el caso de que la velocidad de viento descienda por debajo de un valor establecido se abrirán los contactores de G2 y de su respectivo banco de condensadores, para volver a realizarse el arranque de G1. Este proceso de operación puede ser interrumpido en el caso de producirse un evento que ponga en peligro la integridad del aerogenerador o de las personas que se encuentren próximas al aerogenerador. Los eventos de tales características generan alarmas que corresponden a interrupciones del proceso secuencial aquí descrito, de manera que ante la aparición de éstos el proceso se detiene para dar paso al bloqueo del aerogenerador y a la desconexión del sistema.

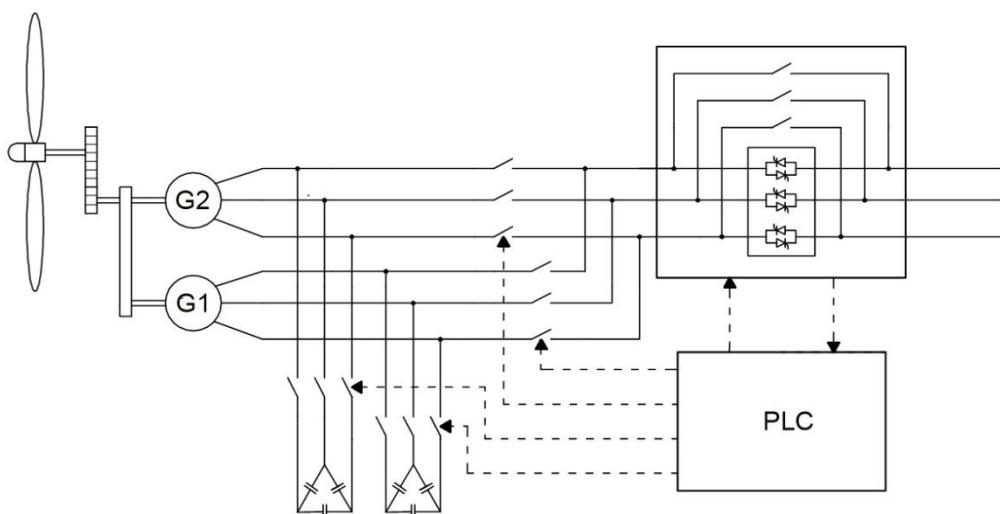


Figura 4.1. Diagrama de bloques del circuito eléctrico del aerogenerador propuesto.

#### 4.1.1 Descripción del programa principal

A continuación se va a realizar la descripción detallada del programa principal de operación del aerogenerador, llevado a cabo por un PLC, cuya elección y programación son objeto del proyecto anexo. El diagrama de flujo de este programa se expone en el apartado séptimo del presente proyecto.

En primera instancia se parte de un estado de reposo del sistema, es decir, el rotor eólico del aerogenerador permanece bloqueado merced al electrofreno del que se dispone y el sistema se encuentra en estado de espera. Una vez iniciado el programa, se comprueba que el anemómetro correspondiente haya detectado una velocidad de viento superior a 4 m/s durante 10 minutos. Si esta condición se cumple, se ejecuta la orden de liberación del freno eléctrico, acción realizada mediante la interrupción de la alimentación de la bobina de mando del electrofreno.

Acto seguido se comprueba si la velocidad del rotor de G1 alcanza el 95% de la velocidad de sincronismo, ya que según la instrucción técnica complementaria ITC BT 40 los aerogeneradores cuyos generadores sean asíncronos no deben conectarse a la red si en el rotor eólico no se ha alcanzado entre el 90% y el 100% de la velocidad de sincronismo. Dada la relación de multiplicación de la correa de transmisión, 1,071, la velocidad en el eje de G2 correspondiente al 95% de la velocidad de sincronismo en el eje de G1 es de 1330 r.p.m. Se comprueba si la velocidad del eje de G2 es superior a ese valor, única velocidad angular monitorizada del sistema. En el caso de no haberse sobrepasado esta velocidad se incrementa una variable de la unidad de control, que la hemos denominado *contador*.

Posteriormente se introduce un retardo de 1 minuto y tras éste se verifica si la variable ha llegado al valor 2. Como no es el caso se vuelve a comprobar la velocidad en el eje, y si aun habiendo transcurrido 1 minuto no se ha alcanzado la velocidad establecida se vuelve a incrementar la variable *contador* y se incrementa de nuevo la variable contador. Esta vez se verifica que *contador* tiene como valor 2 unidades y tras dos minutos de no haberse alcanzado la velocidad comentada se procede a la desconexión del sistema y a la aplicación del freno eléctrico. Con este bucle de seguridad se impide que el sistema de control pretenda arrancar el generador en caso de que el sistema mecánico se encuentre bloqueado por cualquier motivo, y así evitar la posible destrucción de algún componente y la absorción desmesurada de potencia de la red.

Por el contrario, si se ha logrado sobreponer el 95% de la velocidad de sincronismo en G1 se cierra el contactor principal del circuito de potencia, exponiendo a los tiristores de potencia del arrancador a la tensión de red, y también el contactor que conecta eléctricamente a G1 y el arrancador. Un instante después la unidad de control comunica una señal digital de nivel alto al arrancador, el cuál interpreta que el arranque debe comenzarse. El arrancador estático genera una rampa de tensión en bornes de la máquina G1, y cuando esta rampa llega a su fin, es decir, la tensión experimentada en bornes del generador es igual a la de red, el sistema de control del arrancador genera una señal digital de nivel alto que se le comunica al PLC.

Tras recibir esta señal, la unidad de control permite la conexión mediante el correspondiente contactor de la batería de condensadores de G1.

La conexión de la batería se realiza después del arranque debido a los armónicos de tensión que el arrancador genera, que perjudican en gran medida a las baterías como en este mismo capítulo se verá. Se ha alcanzado el estado de régimen permanente del aerogenerador, con G1 operando y con la batería de condensadores compensando la potencia reactiva.

Llegado el aerogenerador a este punto de operación, se comprueba si la velocidad de viento ha descendido por debajo de los 4 m/s durante 20 segundos. En tal caso primero se produce una aplicación del electrofreno para detener el movimiento del sistema de transmisión y rotor al mismo tiempo que la desconexión suave del generador merced al graduador, la cual evita que la interrupción de corriente se realice por medio de los contactores y los polos de éstos sufran por las corrientes de arco, y finalmente se produce la apertura de los contactores que se encuentren cerrados para aislar el sistema de la red. Si por el contrario la velocidad es superior a 4 m/s pero menor a 6,5 m/s, el aerogenerador continúa operando con G1. Cuando la velocidad de viento alcanza 6,5 m/s, velocidad de viento a la que se alcanza la potencia nominal de G1, se realiza la desconexión de este generador, abriéndose el contactor que conecta G1 con el arrancador y el que conecta la batería con el generador. Una vez alcanzado este estado en el proceso secuencial, se comprueba si la turbina alcanza la velocidad correspondiente a 1425 r.p.m. en el eje de G2, valor que corresponde al 95% de la velocidad de sincronismo. Además se vuelve a realizar un bucle de seguridad frente a bloqueo de la máquina, de manera que si no se han alcanzado en 2 minutos 1425 r.p.m, se aplica el freno y se desconecta el aerogenerador.

En el instante en que se alcanzan 1425 r.p.m., el siguiente paso consiste en la conexión del contactor que acopla a G2 con el arrancador, y posteriormente se da la orden de comienzo de arranque al graduador.

Una vez terminada la rampa de arranque, se alimenta la bobina de mando del contactor que conecta la batería de condensadores de G2 con éste para que cierre.

El aerogenerador ahora se encuentra en su estado de régimen permanente, operando G2 y compensándose la potencia reactiva con la batería de condensadores de G2. De este estado se saldrá en el momento que la velocidad de viento descienda por debajo de 6 m/s, situación en la que se desconectan los contactores de G2 y de su batería, se realiza la desconexión de G2 y se vuelve a conectar el contactor de G1, repitiéndose el proceso antes descrito para este generador.

Obsérvese que las conmutaciones de G1 a G2 y de G2 a G1 se realizan para distintos valores de velocidad de viento, produciéndose una histéresis de conmutación. El motivo de realizar una conmutación por histéresis radica en la alta variabilidad de viento. Si se produjeran las conmutaciones al mismo valor de la velocidad de viento, para oscilaciones de velocidad breves en torno al valor fijado se originaría un gran número de paradas y arranques, lo cual resulta perjudicial para el sistema dado que los componentes del sistema de transmisión sufren esfuerzos mecánicos importantes.

En cualquier estado del proceso secuencial descrito se producirá una interrupción del mismo cuando se origine una alarma, momento en el cual se aplicará la subrutina de alarmas, consistente en la secuencia lógica de bloqueo, en la que primero se ejecuta la orden de parada suave al arrancador al mismo tiempo que la de aplicación de freno y en segundo lugar se inhabilitan los contactores. Las alarmas son generadas por los siguientes eventos: sobrecalentamiento de los generadores y del motor de orientación, vibraciones excesivas, sobreintensidad, fallo de fase, fallo en el sistema de orientación, velocidad de viento excesiva, y velocidad de giro excesiva.

## 4.2 Arrancador estático

El graduador trifásico que realizará la función de arranque suave en el aerogenerador propuesto es el **SMC-3** de la firma **ALLEN BRADLEY**, cuya referencia es **150-C60NBR**. Su corriente nominal es de 60 A, su tensión de empleo 400 V y la tensión de alimentación del circuito de control es de 24 V CC. La elección de este arrancador suave se justifica por el control de la tensión de las tres fases del generador que permite, por sus pequeñas dimensiones, por las prestaciones que ofrece en cuanto a protecciones y funciones, por su refrigeración por ventilador de los componentes de potencia evitándose el deterioro por calentamiento de los mismos, y sobretodo por su atractivo precio.

Como ya hemos dicho el SMC-3 es un arrancador compacto, con unas dimensiones de 72 x 206 x 130 mm y con un peso de 2,25 kg. Este dispositivo contiene un contactor de puenteo de los tiristores interno, con lo que se evita la necesidad de un contactor adicional.

Las funciones que puede realizar el SMC-3 son:

- Arranque paulatino por rampa de tensión: Esta función consiste en la aplicación de una rampa de tensión en bornes de las fases de la máquina, consiguiéndose así una absorción de intensidad moderada.  
Durante este método de arranque el dispositivo limita la intensidad absorbida al 150 % de la intensidad nominal, de forma que cuando se alcanza ese valor los ángulos de disparo de los tiristores aumentan para no sobrepasarse el límite. El tiempo de rampa ajustable está comprendido entre 2 y 30 segundos y el par inicial deseado que puede ser ajustado puede variarse en el rango comprendido entre el 0% y el 65% del par en el momento de conexión con tensión plena.
- Arranque por rampa de corriente con limitación de intensidad. Con esta función se permite arrancar la máquina con un valor de corriente linealmente creciente hasta alcanzar el límite establecido. La limitación de corriente se puede ajustar desde un 150% de la corriente nominal hasta un 450 % de ésta.

- Parada suave de la máquina. Esta función consiste en la aplicación de una rampa de tensión negativa a la máquina cuando se desea su detención, de manera que al no desconectarse bruscamente la máquina de la red, el comportamiento mecánico y eléctrico de ésta es mejor que para una desconexión directa. El tiempo de la rampa de parada puede ajustarse desde un 100% hasta un 400% del tiempo de rampa de arranque previamente ajustado.

El modo de operación elegido para la conexión de nuestro aerogenerador será el arranque mediante *rampa de tensión* con limitación de intensidad, ya que proporciona una tensión gradualmente creciente que implica una absorción de corriente muy inferior a la que absorbería el generador conectado de manera directa a la red.

El tiempo de arranque establecido será de *2 segundos*, dado que la máquina es impulsada por el rotor eólico antes de la aplicación de alimentación en el estator del generador, por lo tanto cuando se conecta el generador a la red su rotor está cercano a la velocidad de sincronismo y el régimen transitorio es mucho más breve que el de una máquina arrancada desde el bloqueo.

Asimismo se aplicará la función de *parada suave*. Realmente no se origina una parada de la turbina con este modo de operación ya que en el caso de reducir la tensión de alimentación del generador hasta un valor nulo implicaría un embalamiento del rotor eólico, por lo que se aplicará la función de parada suave al mismo tiempo que el freno mecánico.

Por lo tanto, antes de desmagnetizar los contactores se producirá la desconexión suave, con la finalidad de evitar el deterioro de los contactos de los contactores y evitar un corte brusco de la corriente circulante por la máquina, lo que producirá sobretensiones en las impedancias de línea. Se establece una desconexión suave de la misma duración que el arranque.

Las protecciones que este arrancador estático incluye desconectan el sistema o impiden el arranque, además de abrir un contacto de relé, el cual puede ser utilizado para cortar la alimentación de un contactor con el fin de aislar el sistema de la red. Éstas son las siguientes:

- Protección frente a sobrecarga del motor. El dispositivo interno que realiza esta función es un relé de sobrecarga electrónico, que mediante transformadores de corriente en las tres fases se monitoriza la intensidad que circula por el dispositivo, de manera que si se alcanza un valor superior a la corriente nominal este relé encadenará la desconexión del arrancador.

El tiempo permitido de circulación de corriente por encima de la nominal depende del valor alcanzado por ésta, mayor cuanto menor sea la corriente.

El microprocesador del dispositivo compara con una curva de disparo la corriente sobrepasada y el tiempo de circulación de ésta, y si esos valores corresponden a un punto de la curva, el relé dispara. Puede seleccionarse una clase de disparo de 10, 15 o 20.

- Protección frente a sobretemperatura en tiristores. La temperatura en los componentes semiconductores es detectada por medio de termistores y cuando ésta es superior a la corriente nominal de los tiristores se desconecta el arrancador.

- Protección frente a inversión de fases. Protección seleccionable. Si las fases de alimentación son incorrectas antes de iniciarse el arranque, lo que implica un giro de la máquina en el sentido inverso al deseado, se cancela el arranque.
- Protección frente a desequilibrio de fase. En el caso de que la diferencia de corriente eficaz entre la fase de máxima corriente y la de mínima corriente en desequilibrio es superior al 65% de la corriente nominal durante 3 segundos se desconecta el sistema.
- Protección frente a pérdida de fase. El arranque no se producirá si en una de las fases no se detecta tensión de alimentación, para así evitar un desequilibrio de fases excesivo y producirse un gran calentamiento de la máquina.
- Protección frente a tiristores cortocircuitados: Durante el funcionamiento del dispositivo se comprueba permanentemente si los tiristores trabajan debidamente y no están cortocircuitados, para evitar el desequilibrio de corriente en el caso de cortocircuito de uno de los tiristores.

Para realizar la programación y la manipulación de este dispositivo se cuenta con:

- Un potenciómetro utilizado para indicar la corriente nominal del generador, con el objeto de poderse realizar la protección frente a sobrecarga en función de este valor.
- 16 microinterruptores para establecer todos los demás parámetros en función de los modos de operación y las protecciones deseadas.
- Un pulsador de desconexión. Pulsador cuya función es desconectar el dispositivo.

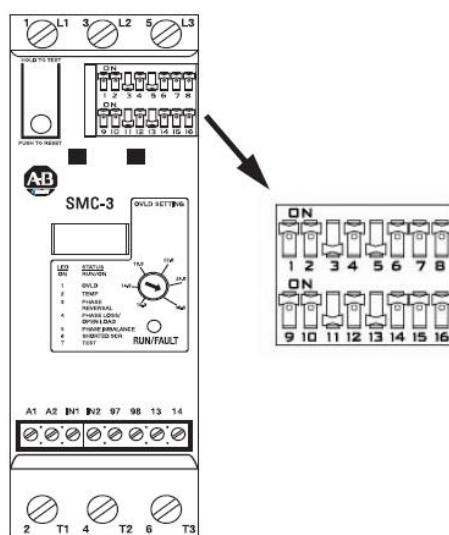


Figura 4.2. Aspecto frontal del arrancador SMC-3.

Los ajustes necesarios para que el arrancador se comporte de la manera deseada en la aplicación que nos concierne son los expuestos a continuación:

- Modo de operación: Para establecer el modo de rampa de tensión se coloca el microinterruptor 3 en la posición ON. Para establecer el mismo tiempo de desconexión que en el arranque, se debe colocar el microinterruptor 6 en posición ON y el microinterruptor 7 en posición OFF.
- Ajustes de rampa: La duración del arranque elegida es de 2 segundos, por lo que deberemos colocar los microinterruptores 1 y 2 en posición OFF. El par inicial ajustado será del 0% con respecto al par inicial a tensión plena, puesto que el rotor ya se encuentra en movimiento en el momento de la conexión y no hace falta vencer un par resistente inicial. Para este cometido deben colocarse los microinterruptores 4 y 5 en posición OFF.
- Protección frente a sobrecarga: La corriente nominal de G2 tiene un valor de 52,39 A para una potencia de 30 KW, pero la potencia máxima que puede desarrollar el generador sin un sobrecalentamiento excesivo es de 33 KW, por tanto la corriente máxima que puede circular por el estator es:

$$I_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi} = 57,63 \text{ A}$$

[Ec. 4.1]

Por tanto se establecerá el disparo del relé de sobrecarga a una intensidad algo mayor que la calculada, 60 A, y así permitir al generador trabajar para sus potencias máximas alcanzables.

Para este valor de disparo el potenciómetro de ajuste debe estar posicionado en su posición más extrema hacia la derecha.

La clase de sobrecarga elegida será clase 10, ya que el generador no tarda más de 10 segundos en arrancar por los motivos anteriormente expuestos. Colocando el interruptor 11 en su posición ON y el 12 en la posición OFF se establece una protección de clase 10.

El reinicio del arranque tras una desconexión por sobrecarga se realizará de manera manual por razones de seguridad. Para ello, debemos colocar el interruptor en posición OFF.

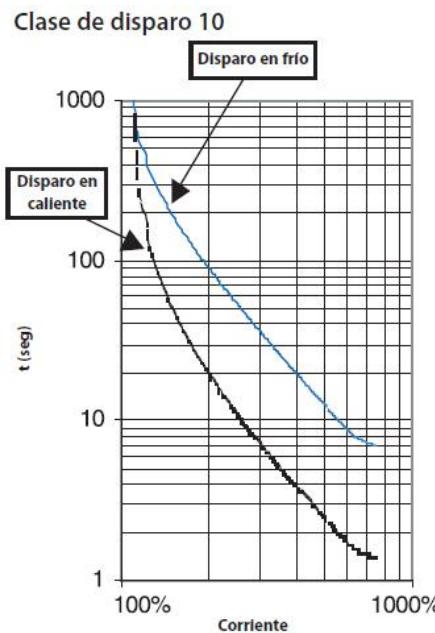


Figura 4.3. Curvas de disparo del relé de sobrecarga del SMC-3.

- Relés de indicación: Utilizaremos un relé auxiliar del dispositivo para la indicación del final de la rampa de tensión. Este relé cierra su contacto cuando finaliza la rampa, que alimentado con una tensión de continua y conectado en serie con una entrada del PLC establece un nivel digital de estado alto en dicha entrada, lo que se interpreta por la unidad de control como final de arranque. Para que este relé indique el final de la rampa debemos colocar el interruptor 14 en posición ON.

Los terminales de control del arrancador estarán conectados tal como se muestra en el plano de *control del arrancador*. Estos terminales pueden observarse en la figura 4.2 y se esquematizan en la siguiente figura.

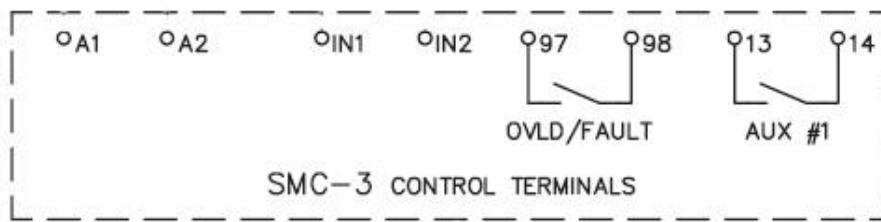


Figura 4.4. Esquema del bornero de control del SMC-3

Los bornes A1 y A2 son de alimentación; se conecta A1 a la fuente de alimentación de corriente continua y A2 a tierra. Los terminales IN1 e IN2 son los de control del arranque y parada respectivamente. Si se establece un nivel de tensión del mismo valor que la alimentación en IN1 comenzará el arranque, y por otro lado si el terminal IN2, estando alimentado a un nivel de tensión igual a la tensión de A1, experimenta un nivel de tensión de 0 voltios se desencadena la parada suave. En nuestro circuito de control se conectan ambos en paralelo a una salida digital del PLC, de manera que cuando ésta presenta nivel alto el arranque comienza, y cuando se establece nivel bajo comienza la desconexión suave.

El contacto del relé se conecta en serie con una entrada del PLC, el cual conmutará una tensión continua sobre dicha entrada.

Por último el contacto del relé auxiliar, programado en modo de señalización de fin de arranque, se coloca en serie con la fuente de alimentación y con una entrada del PLC, para que cuando por esa entrada se detecte nivel alto de tensión la unidad de control pueda conectar la correspondiente batería de condensadores.

#### 4.3 Interruptor seccionador

Con el objeto de interrumpir la corriente que circula por el aerogenerador en caso de emergencia y aislarlo completamente de la red, se dispone un interruptor seccionador, capaz de tolerar la máxima corriente que se pueda presentar en el punto de conexión sin que se deterioren en exceso todos los componentes eléctricos del aerogenerador.

El interruptor seccionador seleccionado es de la firma SIEMENS, cuya referencia es 3KA52 30-1AE01, el cual puede interrumpir o establecer una corriente en servicio continuo de 125 A. La razón de haber escogido una corriente nominal del aparato bastante superior a la máxima del aerogenerador consiste en la poca diferencia de coste entre el interruptor seccionador de corriente nominal inmediatamente superior a la corriente máxima y el propuesto es muy reducida. En esta situación los polos del seccionador presentarán mejor comportamiento y se deteriorarán en menor medida. El interruptor seccionador es denominado en el circuito de potencia como Q1.

#### 4.4 Contactores

El contactor electromagnético es un dispositivo capaz de interrumpir o permitir el paso de la corriente que circula por una carga y al mismo tiempo aislar a ésta de la tensión que la alimenta, o por el contrario someterla a dicha tensión. A este modo de operación se le conoce como conmutación “*todo nada*”, puesto que sólo se opera en dos estados: circulación de toda la corriente solicitada por la carga y ausencia de corriente por el circuito.

La realización de esta función es posible gracias al efecto del campo magnético inducido por una bobina, por la que circula corriente, sobre los contactos de conmutación del dispositivo, los cuales son arrastrados y cambiados de posición por una armadura móvil de baja reluctancia magnética, puesta en movimiento por causa del campo magnético.

Una armadura fija del mismo material que la anterior actúa como polo sur del electroimán resultante, repeliendo a la armadura móvil que corresponde al polo norte y produciéndose así el movimiento. Ambas armaduras componen el circuito magnético por donde circula el campo. Si la bobina se alimenta en corriente alterna, las armaduras de material ferromagnético suelen estar dispuestas en láminas para reducir las corrientes de Focoault. En consecuencia de este desplazamiento se logra la conexión eléctrica de los contactos móviles y de los bornes de alimentación del contactor.

Por consiguiente, el establecimiento de la corriente en el circuito a controlar se producirá cuando se alimente en tensión a la bobina (tensión alterna o continua, dependiendo del dispositivo) y la interrupción de corriente cuando deje de excitarse la bobina de control, ya que los contactos están sujetos con unos resortes a la carcasa del elemento que permiten el retorno de los contactos a su posición de reposo.

El motivo por el que los contactores posean contactos *NA* (normalmente abiertos) es la protección de los receptores frente a caídas de tensión importantes, ya que en el caso de producirse éstas la bobina de control se desmagnetiza y de este modo se abre el circuito.

Debido a este modo de control del aparato, es posible controlarlo a distancia mediante la utilización de un PLC o mediante otro dispositivo de gestión y procesamiento de datos, el cuál genere la orden de establecer o no tensión en la bobina. En este sentido, no se debe confundir el término interruptor seccionador con el de contactor, ya que el interruptor conmuta la corriente de un circuito por acción manual.

El circuito de potencia del aerogenerador PEUI-10 dispone de cinco contactores. Éste se muestra en el apartado plano del circuito de potencia del presente documento. El primer contactor, denominado contactor general *KM1*, alimenta y aísla de la red al arrancador estático y a los dos generadores. El siguiente contactor, *KM2*, impide o permite la circulación de corriente por *G1*, el contactor *KM4* interrumpe o establece la conducción de *G2* y por último los contactores *KM3* y *KM5* conectan los bancos de condensadores de *G1* y *G2*, respectivamente.

La alimentación de las bobinas de mando corren a cargo de sendas salidas de la unidad de control PLC.

#### Contactor general KM1

El contactor general debe ser capaz de soportar la máxima corriente que circule por el circuito de potencia. Esta corriente resulta ser la corriente nominal de *G2*, aunque si éste trabaja con sobrecarga la corriente circulante será superior.

Atendiendo a esta posibilidad y a la instrucción técnica complementaria ITC BT 40, la cual establece que los conductores de una instalación generadora de baja potencia deben soportar una corriente de 1,25 veces la máxima del generador, la corriente nominal de éste contactor debe ser superior a:

$$57,63 \text{ A} \times 1,25 = 72 \text{ A}$$

El contactor elegido para realizar esta función es de la firma SIEMENS, del modelo 3RT10, cuya referencia es 3RT1045 -1BB40.

Su corriente de empleo es igual a  $I_e = 80 \text{ A}$  en categoría AC-3 a 400 V, corriente mayor a la anteriormente calculada, con 10 millones de maniobras admisibles sin que se deterioren los contactos en exceso.

Presenta un poder de cierre de 1500 A y un poder de corte de 1100 A. El control de la bobina se realiza mediante una tensión digital de 24 V CC desde el PLC.

#### Contactor del generador pequeño KM2

De la misma forma que el anterior contactor, el KM2 deberá soportar una corriente de 1,25 veces la máxima que por G1 circule.

$$I_{G1Max} = \frac{P_{G1Max}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi_{G1n}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 17,87 \text{ A}$$

[Ec.4.2]

Por tanto la corriente de empleo del contactor será superior a:

$$17,87 \text{ A} \times 1,25 = 22,34 \text{ A}$$

El contactor elegido que permite e interrumpe la corriente a través de G1 es de la firma SIEMENS, de la serie 3RT10, cuya referencia es 3RT10- 3BB40 con una corriente de empleo de  $I_e = 25 \text{ A}$ , y con el resto de características idénticas al anterior contactor.

#### Contactor del generador grande KM4

El contactor KM4 es idéntico al contactor KM1, ya que la corriente nominal que circulará por ambos es la misma. Su corriente de empleo es de 80 A.

#### Contactores de los bancos de condensadores

La impedancia de un condensador en el instante inicial de su conexión a red es nula.

Por tanto la corriente que circulará en ese instante por él y por los elementos que se encuentren aguas arriba con respecto a la red de alimentación será la corriente de cortocircuito del punto al que esté conectada la batería.

Además, si los condensadores no han sido debidamente descargados después de abrir el contactor, podría ser que en la próxima conexión los condensadores estén cargados a la tensión opuesta a la que en el instante de conexión presenta la red, de forma que la corriente aún sería de mayor magnitud. Por todo ello, los contactores necesarios para llevar a cabo la función de conexión y desconexión de baterías deben poder soportar esos picos de corriente que, aunque breves, son elevados.

Con el fin de evitar desperfectos en el cableado y en los componentes de conmutación como son los contactores, se establece en la norma UNE-EN 60831-1 que éstos deben ser capaces de tolerar una corriente igual a 1,5 veces la corriente de empleo de los condensadores. En el caso de contactores, para este cometido se utilizaría un contactor de la categoría AC-1 de corriente nominal 1,5 veces la corriente de empleo.

Otra alternativa consiste en la utilización de contactores especiales para conmutación de baterías.

En concreto, los contactores 3RT16 de la firma SIEMENS están adaptados para establecer e interrumpir corriente por condensadores. Estos modelos están equipados con unas resistencias colocadas en paralelo a los contactos principales para limitar la corriente inicial de carga del condensado. Mediante la actuación de unos contactos de efecto adelantado se intercalan en serie las resistencias con los condensadores, y sólo cuando éstos han llegado a un determinado valor de carga abren los contactos auxiliares y cierran los contactos principales, encontrándose en ese momento la red a un valor de tensión parecido al del condensador.

Los contactores utilizados para la conmutación de las baterías deberán ser capaces de tolerar una corriente mayor a la que circula por éstas. Esas corrientes son:

$$I_{b1l} = \frac{Q_{b1}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot \operatorname{sen} \varphi} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 380.1} = 3,8 \text{ A}$$

$$I_{b2l} = \frac{Q_{b2}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot \operatorname{sen} \varphi} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 380.1} = 15,2 \text{ A}$$

[Ecs. 4.3 y 4.4]

En estas expresiones  $Q_{b1}$  y  $Q_{b2}$  corresponden a la potencia reactiva de los bancos de G1 y G2, respectivamente;  $I_{b1l}$  y  $I_{b2l}$  corresponden a las corrientes de línea de los bancos de condensadores G1 y G2.

Finalmente se han escogido dos contactores de la marca SIEMENS, modelo 3RT16, ambos idénticos y de referencia 3RT16-1AP03. Éstos como se acaba de comentar son contactores de carácter especial idóneos para la conmutación de condensadores, y los elegidos en concreto toleran una corriente de empleo de los condensadores de 19 A.

## 4.5 Protecciones

### 4.5.1 Interruptores automáticos

Los interruptores automáticos o disyuntores son dispositivos capaces de interrumpir la corriente de un circuito eléctrico.

Cuando ésta ha sobrepasado un cierto valor durante un cierto tiempo que pueda dañar los componentes del circuito, operando en sobrecarga. Asimismo interrumpen corrientes originadas por cortocircuitos en un tiempo ínfimo.

La gran ventaja que aportan los interruptores automáticos frente a los interruptores fusibles consiste en el restablecimiento del funcionamiento del sistema protegido sin necesidad de remplazar el dispositivo protector, ya que los disyuntores, una vez reparado el daño y desaparecida la causa que lo originó pueden rearmararse para que la operación del circuito en cuestión se restablezca. El rearne de los interruptores automáticos es manual, con el fin de que sea comprobado el buen estado de los componentes por personal cualificado. Cuando un interruptor automático dispara interrumpe la corriente del circuito y lo aísla de la tensión de red, por lo que éste también hace las veces de seccionador.

Es posible utilizar estos dispositivos como interruptores seccionadores manuales por medio del mando manual dispuesto a tal efecto.

El tiempo de respuesta a la sobrecarga es función de la corriente circulante e inversamente proporcional a ésta. La relación de estas dos magnitudes se expresa en las curvas de disparo, las cuales dependen del diseño del dispositivo.

Estos elementos han sido elegidos en este proyecto para proteger a los generadores y a todos los demás elementos eléctricos del aerogenerador frente cortocircuitos y sobrecarga. En total se han dispuesto cuatro disyuntores para protección global de todos los componentes, para protección de ambos generadores y el arrancador y para protección del circuito de control.

#### Interruptor automático general Q3

Este interruptor se encarga de proteger todos los componentes eléctricos del sistema generador, encontrándose en el punto de interconexión con la red de distribución. La corriente de disparo de este dispositivo corresponde a la máxima corriente que puede fluir desde el punto de conexión hasta el interruptor. Ésta resulta de la suma de la máxima corriente admisible absorbida por el generador en el momento de conexión, funcionando la máquina como motor, y de la corriente absorbida por el circuito de control y el sistema de orientación.

La corriente máxima permisible del generador de mayor potencia se calcula en la ecuación 4.2; su valor es de 57, 63 A.

La corriente absorbida por el circuito de control, el sistema de orientación y el freno eléctrico resulta ser de 9,4 A, con lo cual la corriente de sobrecarga del interruptor Q1 debe ser fijada a 67 A.

Como interruptor general se establecerá un interruptor automático magneto-térmico de la firma SIEMENS, del modelo 3RV10, cuya referencia es 3RV10 41 -4KA10. Consiste en un interruptor trifásico de clase 10 con corriente nominal de 75 A. El disparo por sobrecarga se ajustará a una intensidad de 67 A y el disparo sin retardo por sobreintensidad se producirá a una corriente de 975 A. Este interruptor posee un poder de corte de 50 kA.

#### Interruptor automático del generador pequeño Q5

Se requiere un disyuntor motor que proteja frente a sobrecarga y cortocircuito a G1. La corriente a la potencia nominal de este generador, anteriormente calculada, es de 13,4 A. Sin embargo no es la máxima permitida por el generador, ya que la potencia máxima que este puede desarrollar es de 10 KW, por lo que la corriente máxima será:

$$I_{G1max} = \frac{P_{G1max}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot \cos \varphi} = 17,34 \text{ A}$$

[Ec.4.3]

Por ello, la corriente de disparo por sobrecarga del interruptor Q4 se debe ajustar a 17 A. El interruptor automático magneto-térmico de la marca SIEMENS, de la serie 3RV10, con referencia 3RV1041- 4BA10, se encargará de realizar la protección de G1. Éste es trifásico de clase 10 con una corriente nominal de 20 A y tiene un poder de corte de 50 KA.

La corriente de disparo térmico será ajustada a 17 A y el disparo sin retardo por sobreintensidad se producirá con una corriente de 260 A.

Este dispositivo debe ser colocado entre el arrancador estático y G1 aguas abajo del punto de conexión de G2 con el arrancador, ya que en caso contrario el interruptor dispararía durante la operación de G2.

#### Interruptor automático del generador grande Q4

El elemento de protección de G2 contra sobrecalentamiento de sus bobinados y corrientes de cortocircuito debe estar calibrado a una corriente de disparo cercana a 57, 63 A, corriente correspondiente a la potencia máxima permitida del generador. Este dispositivo debe ser colocado aguas arriba del arrancador estático, con el fin de proteger a éste de corrientes de cortocircuito.

La función del interruptor Q3 la ejercerá un disyuntor motor magneto-térmico de la marca SIEMENS, serie 3RV10, de referencia 3RV1041- 4JA10, trifásico de clase 10 con una intensidad nominal de 63 A y un poder de corte de 50 kA. La corriente de disparo por sobrecarga se establecerá en 58 A y el disparo por sobreintensidad sin retardo se producirá cuando por el circuito circule una intensidad de 819 A.

### Interruptor automático del circuito de control Q6

Resulta necesaria la protección contra sobrecarga y cortocircuito de la unidad de control, el freno eléctrico, el sistema de orientación. Según la información facilitada por el proyecto complementario al presente la corriente solicitada por todos estos elementos es de 9,4 A, así que se establecerá un interruptor automático regulado a una corriente de disparo cercana a ese valor.

Para la protección del circuito de control se ha propuesto un interruptor automático de la marca SIEMENS, de la serie BETA 5SY4, de referencia 5SY4-110-5. Consiste en un interruptor magneto-térmico monofásico con una curva de disparo de tipo A, según la norma CEI/EN 60898.

Las curvas de disparo de tipo A son idóneas para circuitos de control que utilizan semiconductores, ya que éstos son muy sensibles a elevaciones de corriente considerables, del orden de 3 veces sus corrientes nominales. La corriente nominal de este dispositivo es de 10 A y su poder de corte de 10 KA, la corriente de disparo por sobrecarga es de 10 A y el disparo por sobreintensidad sin retardo se produce con una corriente fluyendo por el interruptor de 40 A.

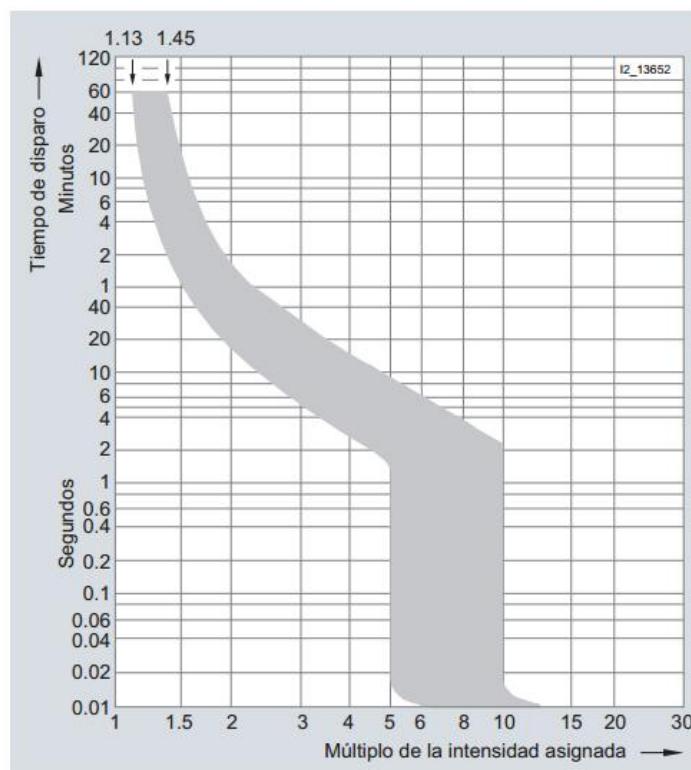


Figura X. Curva de disparo de los interruptores Q3, Q4 y Q5.

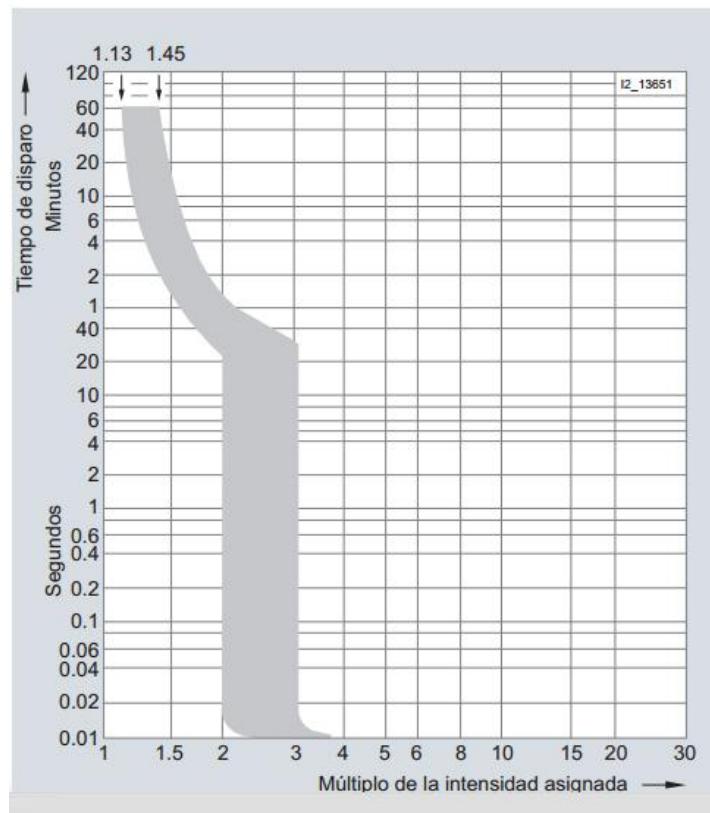


Figura x. Curva de disparo del interruptor Q6.

#### 4.5.2 Fusibles para semiconductores

Los arrancadores estáticos, como se ha comentado a lo largo del presente texto, contienen tiristores para realizar la reducción de tensión eficaz en el estator del generador durante el transitorio de conexión. Los tiristores están compuestos de material semiconductor, el cual tiene una baja capacidad térmica. Por otro lado la densidad de corriente que presentan en condiciones de corrientes de cortocircuito es muy elevada, por lo que es de gran importancia evitar que estas corrientes circulen por los semiconductores y extinguirlas lo más rápidamente posible. Para tal cometido se propone la utilización de interruptores fusibles de acción ultra-rápida, de manera que cuando se produzca una corriente originada por un cortocircuito dichos fusibles la interrumpan con su fusión en cuestión de milisegundos.

Con la inclusión de estos elementos de protección se conseguirá una coordinación de tipo 2, establecida por la norma IEC-947-4, la cual implica que tras un cortocircuito los materiales de una instalación no deben presentar desperfectos ni desajustes de ningún tipo. Los fusibles de acción rápida para semiconductores evitan que se destruyan los tiristores del arrancador por causa de cortocircuito, por lo que sumada esta protección a la de cortocircuito y sobrecarga de los demás elementos mediante los interruptores automáticos y las protecciones térmicas, se consigue una coordinación de tipo 2.

Los fusibles de acción rápida que se conectarán aguas arriba de cada fase del arrancador estático son de la firma SIBA, con referencia 10-007-07 63A. Estos fusibles son de tipo gR, con corriente nominal de 63 A, poder de corte de 50 kA y de valor  $I^2 \cdot t$  de 2260.

El fabricante del arrancador propuesto suministra el valor de  $I^2 \cdot t = 2350$  en condiciones de reaplicación de tensión inversa posterior al pulso de corriente, que corresponde al más restrictivo. Por tanto los fusibles elegidos presentan una buena protección de los semiconductores.

#### 4.5.3 Relés de protección

La instrucción ITC- BT 40 establece que las instalaciones generadoras de baja tensión deben desconectarse de la red eléctrica en el momento que se sobrepasen unos límites fijados de máxima y mínima frecuencia y máxima y mínima tensión. Las protecciones que actúen sobre el sistema para su desconexión frente a fluctuaciones de tensión y frecuencia son:

- De mínima tensión instantáneos, conectadas entre las tres fases y neutro y actuarán en un tiempo inferior a 0,5 segundos a partir de que la tensión alcance el 85% del valor asignado de la red.
- De sobretensión, conectada entre una fase y neutro, y cuya actuación debe producirse en un tiempo inferior a 0,5 segundos, a partir de que la tensión alcance el 110% de la tensión asignada de red.
- De máxima y mínima frecuencia, conectado entre fases, y cuya actuación debe producirse cuando la frecuencia sea inferior a 49 Hz o mayor a 51 Hz durante 5 periodos.

Los efectos nocivos de las fluctuaciones excesivas de tensión y frecuencia para la red ya fueron abordados en el capítulo 1, apartado 1.1.6.

Los dispositivos encargados de desconectar el aerogenerador cuando se sobrepase alguno de estos límites son de la firma LOVATO ELECTRIC. Éstos son dos relés, uno de máxima y mínima frecuencia y el otro de máxima y mínima tensión. Sus referencias son PMF20A41 y PMV50A575, respectivamente, y su tensión nominal de 380 V de línea.

El relé de máxima y mínima tensión es conectado a las tres fases de la instalación, aguas abajo del interruptor automático general, con el fin de protegerlo frente a corrientes de cortocircuito. Se ajustarán los potenciómetros de selección de las tensiones de disparo en las posiciones correspondientes a tensiones de disparo del 85% y el 110% de la tensión de red. Si las tensiones presentan valores fuera de estos límites se abre un contacto. Asimismo se detecta la falta de cualquiera de las fases, de manera que en presencia de ésta también se abrirá el contacto. El potenciómetro de tensión de empleo se ajusta a 380 V. El tiempo de retardo del disparo se establecerá a 100 ms, para que de este modo no se desconecte el sistema por una falta muy breve de tensión.

Para realizarse la protección en nuestro circuito frente a fluctuaciones de tensión, se alimentará al contacto de salida con una fuente de alimentación continua e irá dispuesto en serie con una entrada del PLC. El contacto es normalmente abierto, de manera que cuando la tensión se encuentra fuera de los límites establecidos se interrumpe la alimentación de la entrada de la unidad de control, lo que es interpretado por éste como fallo del sistema y se aplicará el freno para luego desconectar el aerogenerador. El rearne es automático, por lo que una vez que la tensión presenta un valor permitido el contacto de salida cierra y la entrada de la unidad de control recibe valor alto de tensión, la cual permite volver a iniciar el arranque del aerogenerador.

El relé de máxima y mínima frecuencia será conectado entre dos de las fases de la instalación, aguas abajo del interruptor automático general. Se establecerán los límites mediante los correspondientes potenciómetros a 49 Hz y a 51 Hz. De la misma forma que el relé de tensión, la onda de tensión cuya frecuencia que no se encuentre en el intervalo comprendido entre las frecuencias mínima y máxima desencadenará la apertura del contacto de salida. El método de protección contra fluctuaciones de frecuencia en el aerogenerador es idéntico a la protección de sub y sobretensiones, conectándose obviamente el contacto de salida del relé a una entrada distinta del PLC. El rearne de este dispositivo también es automático.

#### 4.5.4 Descargadores de tensión

Los descargadores de tensión consisten en elementos de protección frente a sobretensiones elevadas originadas generalmente por descargas atmosféricas. Estos dispositivos se conectan en paralelo con el dispositivo a proteger y actúan reduciendo su resistencia eléctrica ante la presencia de una tensión de gran magnitud en el punto al que se hallen conectadas.

La norma IEC 61400- 24 define las zonas de protección en un aerogenerador, zonas a su vez definidas por la norma IEC 1312-1. La norma IEC 61400- 24 establece como zonas LPZ 0A, nivel en el cual los objetos son susceptibles de recibir un impacto directo de un rayo, la parte superior del aerogenerador, es decir, donde se encuentran la torre y la góndola, y la zona del punto de conexión del aerogenerador con la red eléctrica. Por este motivo se colocarán descargadores de tensión en bornes de los generadores, alojados en la góndola, y en la acometida de tensión que sean capaces de descargar la corriente generada por el rayo.

Por otro lado es necesaria la protección frente a tensiones inducidas por el campo electromagnético originado por la corriente del rayo en los componentes electrónicos del aerogenerador, ya que los potenciales elevados pueden originar la ruptura dieléctrica de los transistores de las unidades de control de los dispositivos, destruyéndose la estructura de puerta.

La tensión que pueden soportar los componentes electrónicos es muy inferior a la de otro tipo de componentes como motores o cargas resistivas, siendo ésta generalmente del orden de 2000 V. Por consiguiente, los descargadores que protejan los dispositivos electrónicos deben ser de un nivel de protección  $U_p$  menor que el resto de los descargadores del aerogenerador.

Atendiendo estas consideraciones, se colocarán descargadores trifásicos derivados a tierra en bornes con los dos generadores del aerogenerador y en el punto de conexión con la red de alta corriente máxima de descarga.

Por otro lado el dispositivo PLC y el arrancador estático serán protegidos con descargadores trifásicos derivados a tierra con un nivel de protección lo suficientemente bajo para evitar la destrucción de componentes electrónicos. Se conectarán un descargador a cada lado del arrancador estático, lado de generador y lado de red, para asegurar la protección.

Los descargadores de sobretensión con los que se protegerá el sistema eléctrico del aerogenerador frente a sobretensiones son de la firma DELIXI.

Se instalarán en paralelo con los generadores y el punto de conexión descargadores de tres polos con derivación a tierra de la marca DELIXI de referencia CDY1-100/3, los cuales permiten una corriente máxima de descarga de 100 kA para un choque de rayo indirecto, proporcionan un nivel de protección de 3000 V, toleran una tensión máxima de trabajo de 420 V y presentan un tiempo de respuesta de 25 ns.

Para la protección de los equipos electrónicos se dispondrán descargadores DELIXI CDY1- 40/3, que permiten una corriente máxima de descarga de 40 kA para un choque de rayo indirecto, su nivel de protección es de 2000 V, su tensión máxima de trabajo de 440 V y el tiempo de respuesta de descarga es de 25 ns.

#### **4.5.5 Interruptor diferencial contra contactos directos e indirectos**

Se colocará en serie con el interruptor automático general un interruptor diferencial para protección contra contactos directos e indirectos de seres vivos de la marca EPP y referencia DE FI63-4-30-63, con intensidad nominal 63 A, 4 polos,  $\Delta I_n=30$  mA y de clase A (diferencial inmunizado frente a armónicos). En el circuito de potencia se le denomina Q2.

#### **4.6 Bancos de condensadores**

La compensación de energía reactiva de los generadores de este sistema eólico se realiza con bancos de condensadores fijos, uno por cada generador. Estas baterías se disponen en derivación con cada generador, de manera que se conectan a ellos a través de contactores una vez finalizado el transitorio de arranque de estos generadores. Esto se debe a que los armónicos de tensión que genera la acción del graduador son de elevadas frecuencias, lo que implica que los condensadores presenten unas impedancias muy bajas frente a éstos.

De producirse un consumo de corriente por parte de los condensadores de gran magnitud, con lo cual existe riesgo de destrucción de los condensadores por calentamiento.

Los condensadores deben ser descargados por bobinas o resistencias de descarga que actúen cuando los bancos se desconectan, con el fin de que no permanezca cargado a una tensión tras la desconexión, ya que podría ser que en la siguiente conexión la tensión de fase y la tensión del condensador se encuentren en oposición de fases, situación en la cual por los condensadores circularían corrientes muy elevadas, con sus consiguientes inconvenientes.

Las baterías de condensadores propuestas para la compensación de energía reactiva de los generadores son de la firma SIEMENS. El banco que compensa G1 tiene una referencia según el fabricante de ES2: 4RY0002-0NP40, por los cuales fluye una potencia reactiva de 2,5 kVAr a 380 V. El banco compensador de G2 es de referencia ES2: 4RY0010-0NP40, los cuales aportan una potencia reactiva de 10 kVAr a 380 V. Ambas baterías poseen resistencias de descarga internas. Los cálculos necesarios del valor necesario de las baterías que realicen una compensación idónea fueron realizados en el capítulo 2.

Por otra parte se debe tener en cuenta el comportamiento de los condensadores frente a corrientes de cortocircuito. Los condensadores ofrecen una impedancia muy reducida a impulsos de corriente muy elevados, por lo que éstos circularán por los condensadores en vez de por otras cargas conectadas en paralelo con ellos. Por este motivo deben protegerse las fases de las baterías con fusibles APR (alto poder de ruptura), capaces de interrumpir corrientes muy elevadas.

Por estos fusibles circularán unas corrientes en régimen permanente de 3,8 A (fusibles de la batería de G1) y 15,2 A (fusibles de la batería de G2), corrientes calculadas en las ecuaciones del apartado 3.1.5.

Debe tenerse en cuenta que estos fusibles deberán soportar corrientes mayores que la régimen permanente de los condensadores.

En este sentido la norma UNE-EN 60831-1 establece que los componentes de protección deben ser capaces de soportar una corriente de 1,5 veces la de empleo de los condensadores, por tanto las corrientes nominales de los fusibles propuestos deberán ser superiores a:

$$I_{F1n} = 3,8 \times 1,5 = 5,7 \text{ A}$$

$$I_{F2n} = 15,19 \times 1,5 = 22,8 \text{ A}$$

Los fusibles de alto poder de ruptura que protegen a los condensadores son de la marca SIBA. La batería de condensadores de G1 estará protegida por tres fusibles, uno en cada fase, del modelo 20000-13.6, con una corriente nominal de 6 A y un poder de ruptura de 120 kA. Por otro lado la batería de G2 estará protegida con tres fusibles del modelo 20000-13.25, de corriente nominal 25 A y poder de corte de 120 kA.

#### 4.7 Cables de potencia

Los cables de potencia de la instalación deben ser dimensionados convenientemente. La instrucción ITC-BT 40 establece que los cables de conexión deben estar dimensionados para una corriente de 1,25 veces la corriente máxima del generador, para que de este modo el material aislante no sufra desperfectos.

En este sentido, y teniendo en cuenta las corrientes máximas de los generadores calculadas anteriormente, las corrientes nominales de los cables que conectan G1 y G2 con el arrancador estático deberán ser de:

$$I_{c1n} = 1,25 \times 17,87 = 22,34 \text{ A}$$

$$I_{c2n} = 1,25 \times 57,63 = 72 \text{ A}$$

Asimismo, la ITC-BT 40 impone que la caída de tensión entre el generador y el punto de interconexión con la red no debe ser superior al 1,5% de la tensión de red, para la intensidad nominal. Para ello se deberán colocar unos cables cuya sección implique una caída de tensión inferior a la establecida por la instrucción.

La caída de tensión en un conductor se expresa en la siguiente ecuación:

$$Cdt(v) = \frac{L \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi)}{c \cdot s}$$

[ Ec. 4.4]

Donde:

Cdt (v): caída de tensión en el conductor.

L: longitud del cable (m)

I: corriente que por el conductor circula

c: conductividad del material (  $10^6 \text{ S/m}$  )

s: sección del cable ( $\text{mm}^2$ )

Para el cálculo de la sección de los cables se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones: a caída de tensión máxima permitida para la corriente nominal es de 5,7 V, teniendo en cuenta que la tensión de la red a la que está conectado el aerogenerador es de 380 V. El punto de conexión con la red se encuentra a aproximadamente 50 m, y teniendo en cuenta que la altura de la torre es de 12 m, la longitud total desde el generador hasta la alimentación será de 62 m. La conductividad del cobre tiene un valor de  $56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . Se considerará un factor de potencia unidad, el más desfavorable para la caída de tensión.

Por tanto, la sección del cable que une G2 con el punto de conexión deberá ser superior a:

$$s = \frac{\sqrt{3} \cdot 62 \cdot 52,39 \cdot 1}{56 \cdot 5,7} = 17,62 \text{ mm}^2$$

El cable que une G1 con el armario de potencia de la base del aerogenerador, de 12 m, puede ser de una sección mucho menor, ya que la distancia que recorre es inferior a la comprendida entre G2 y el punto de interconexión. Teniendo en cuenta la sección de cable planteada para los conductores que conecten el armario de potencia con el punto de conexión, la caída de tensión de línea en ellos, cuando circule la corriente nominal de G2 será de:

$$Cdt(v) = \frac{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 13,4 \cdot 1}{56 \cdot 17,62} = 1,17 \text{ V}$$

Esta caída de tensión implica que en los cables que alimentan a G1 estaría permitida una caída de tensión de 4,52 V, la cual corresponde a una sección de los cables de 1.1 mm<sup>2</sup>.

## 5 Simulación y modelado del aerogenerador

Se ha realizado una simulación del funcionamiento del aerogenerador con la herramienta SIMULINK del programa informático MATLAB 7.12.0.635. La librería SimPowerSystems que incluye la aplicación contiene el modelo virtual de todos los componentes eléctricos necesarios para realizar un modelado aproximado del sistema eólico que nos acontece y que permite realizar la simulación del comportamiento en función de una serie de parámetros.

El objetivo de este capítulo del proyecto es facilitar la comprensión del comportamiento eléctrico del aerogenerador así como realizar un detallado análisis de la formas de onda de la tensión y corriente y las variaciones que sufren el par y la velocidad en el generador, arrancado mediante un graduador trifásico durante todo el régimen de funcionamiento, tanto en el momento de conexión como durante el régimen permanente. Asimismo, se ha considerado interesante el estudio del comportamiento del aerogenerador conectado a la tensión de red mediante un graduador bifásico para constatar las desventajas que presenta este método de arranque, y así poner en evidencia el motivo de la elección de un arrancador estático trifásico para realizar la conexión a red de los generadores de manera controlada.

En primer lugar, se va a mostrar la simulación del efecto de un graduador, tanto bifásico como trifásico, que permuta las ondas de tensión alternas recibidas de un sistema trifásico de tensiones y las aplica sobre una carga óhmico-inductiva, con el fin de poder comprender de manera óptima las formas de onda en los generadores eólicos posteriormente. Seguidamente se expondrán las ondas de corriente y tensión en el modelado de la máquina asincrónica que simulan a los generadores disponibles del aerogenerador, en funcionamiento como motor regulados por un graduador trifásico.

Finalmente se mostrará el comportamiento de cada generador para distintas velocidades de viento conectados con un arrancador estático que proporciona una rampa de tensión en los instantes de arranque.

La simulación del aerogenerador se realizará primero con un arrancador trifásico y en segundo lugar con uno bifásico.

## 5.1 Graduador trifásico

En primera instancia es necesario realizar el modelado en SIMULINK del graduador, tanto de su circuito de control como de su circuito de potencia.

### 5.1.1 Generador de pulsos

El bloque del generador de pulsos es el encargado de originar el impulso que disparará a uno de los tiristores, el correspondiente a la conducción en el semiciclo positivo de la onda de tensión a partir de la cual se genera el impulso, en el instante de esa onda requerido por la referencia de entrada al bloque.

El resto de disparos para los otros tiristores serán obtenidos del resultante de este bloque, convenientemente desfasados de la manera en que se explicará en la descripción del bloque del circuito de potencia del graduador. El bloque generador de pulsos se muestra en la siguiente figura:

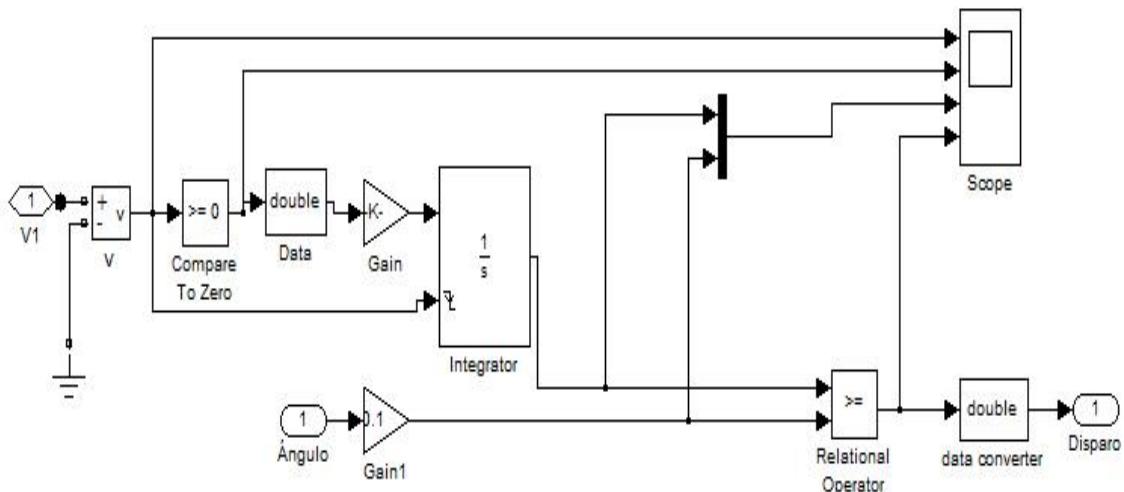


Figura 5.1. Bloque generador de pulsos

El funcionamiento de este bloque es el siguiente: la tensión de fase que entra al bloque se compara con el valor 0 mediante un bloque dispuesto a tal efecto, para obtener una onda cuadrada a la salida de ese comparador en sincronismo con la tensión de entrada, con valor

alto para los semiciclos positivos de la onda de entrada y valor bajo para los semiciclos negativos.

A esta onda cuadrada resultante se le aplica una ganancia y posteriormente se integra con respecto al tiempo, con el fin de obtener una señal de rampa en sincronismo con los semiciclos positivos de la onda de entrada. Para que la rampa se reinicie al final de cada semiciclo positivo, se reinicia el integrador cuando comienzan los semiciclos negativos.

El objetivo de esta onda en diente de sierra es ser comparada con el valor del ángulo deseado con el que se desea disparar a los tiristores, de manera que cuando la rampa alcance el valor del ángulo el comparador correspondiente presentará en su salida valor de nivel alto.

Cuando se reinicie la rampa el valor del ángulo será mayor que el valor de la rampa y la salida del comparador presentará valor de nivel bajo.

Los valores de las ganancias que deben aplicarse a la referencia del ángulo deseado y a la onda cuadrada que entra en el integrador deben ser ajustados para que se realice una comparación correcta. Supongamos que el rango del ángulo de disparo esta comprendido entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . Si se le aplica una ganancia a la entrada del ángulo requerido de 0.1, entonces la rampa deberá alcanzar un valor de 18 antes de reiniciarse. De esta manera se consigue que la salida del bloque generador de pulsos corresponda a un pulso que se inicie en el instante de la tensión de red correspondiente al ángulo fijado en la entrada del bloque.

La onda cuadrada resultante de la comparación con 0 de la tensión de red resulta ser de valor 1 en el nivel alto y de valor 0 en el nivel bajo. La expresión de una integral de un valor constante, correspondiente a la entrada del bloque del integrador cuando la onda cuadrada tiene valor de nivel alto, es la siguiente:

$$\int_0^t K \cdot dt = K \cdot t$$

[Ec.5.1]

El resultado de esta expresión corresponde a la expresión de la rampa de salida del integrador en función del tiempo. Para que, en el momento en que la onda cuadrada de entrada conmute al valor de nivel bajo, el valor de la rampa sea de 18 y teniendo en cuenta que la duración de la rampa es de 0.01 segundos, mitad del período de la tensión de red de 50 Hz, la ganancia que se aplica a la onda cuadrada a la salida del bloque de comparación con 0 deberá ser de:

$$K = \frac{18}{0.01} = 1800$$

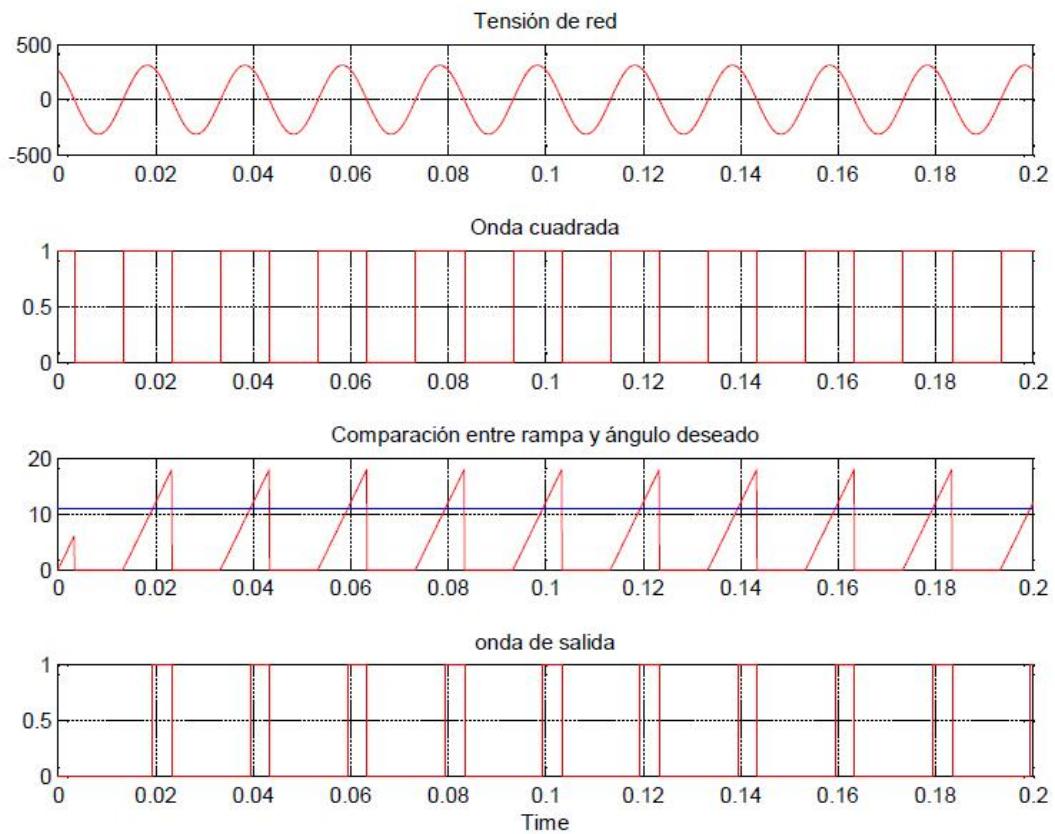


Figura 5.2. Ondas del bloque generador de pulsos

### 5.1.2 Circuito de potencia

El subsistema del circuito de potencia del graduador corresponde al bloque de tiristores del mismo y sus respectivas redes snubber. Estos son 6 para un graduador trifásico, dispuestos por pares en antiparalelo, y cada pareja de tiristores controlan la tensión de una de las fases de la carga. La figura 4.4 muestra la estructura de este subsistema.

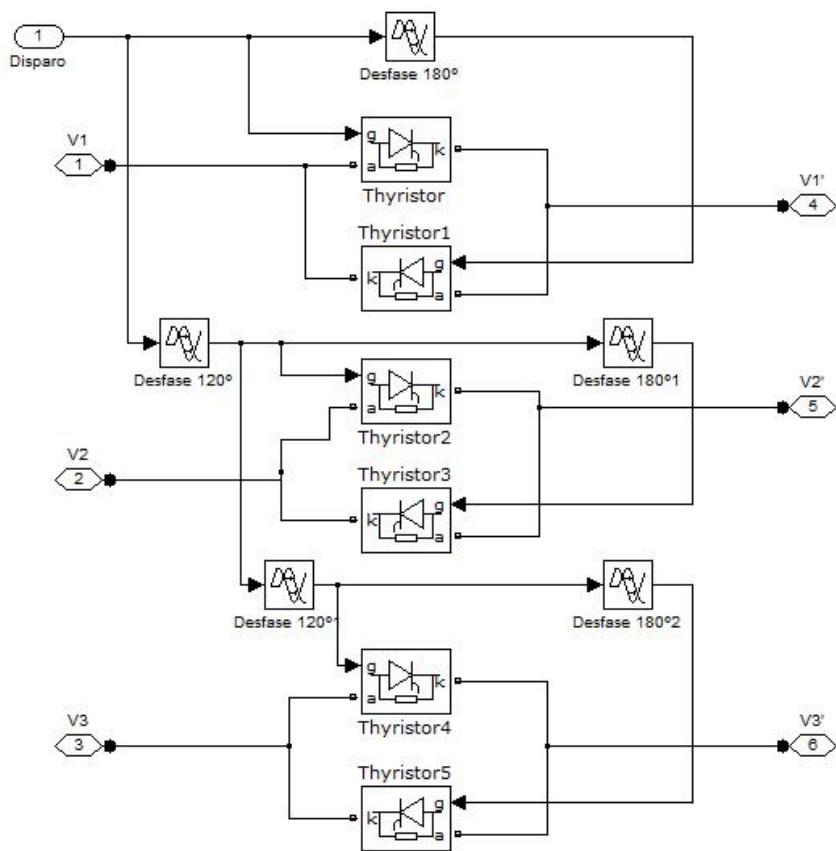


Figura 5.3. Bloque de tiristores

Como se observa en la figura, el primer tiristor, el cual conduce en los semiciclos positivos de V1, es disparado con la señal de disparo que proviene del subsistema generador de pulsos, ya que la tensión del sistema trifásico a la que están referidos los impulsos de disparo de este bloque es V1 y éstos aparecen en el semiciclo positivo de esa tensión. Para realizar el disparo del tiristor que se encuentra en oposición, de tal forma que el ángulo de disparo en los semiciclos negativos con respecto al inicio sea igual al de los semiciclos negativos, se desfase el impulso de disparo de la entrada 180°, ángulo de desfase entre el inicio de los semiciclos positivos y negativos. El tercer tiristor, que conduce en los semiciclos positivos de V2, se disparará con un impulso desfasado 120° con respecto al impulso de disparo de la entrada, ya que en un sistema trifásico las tensiones de fase están desfasadas entre sí. De esta manera se consigue que este tiristor dispare con el mismo ángulo de disparo que el primer tiristor con respecto a su tensión de fase. De la misma forma que en la anterior fase, el cuarto tiristor se disparará con un impulso desfasado 180° al disparo del tiristor que se encuentra en oposición a él.

Por último, el quinto tiristor correspondiente a la conducción en los semiciclos positivos de la fase V3 se dispara con un impulso desfasado 120° con el impulso homólogo de la fase V2 y el sexto tiristor se dispara con un impulso desfasado 180° con el anterior.

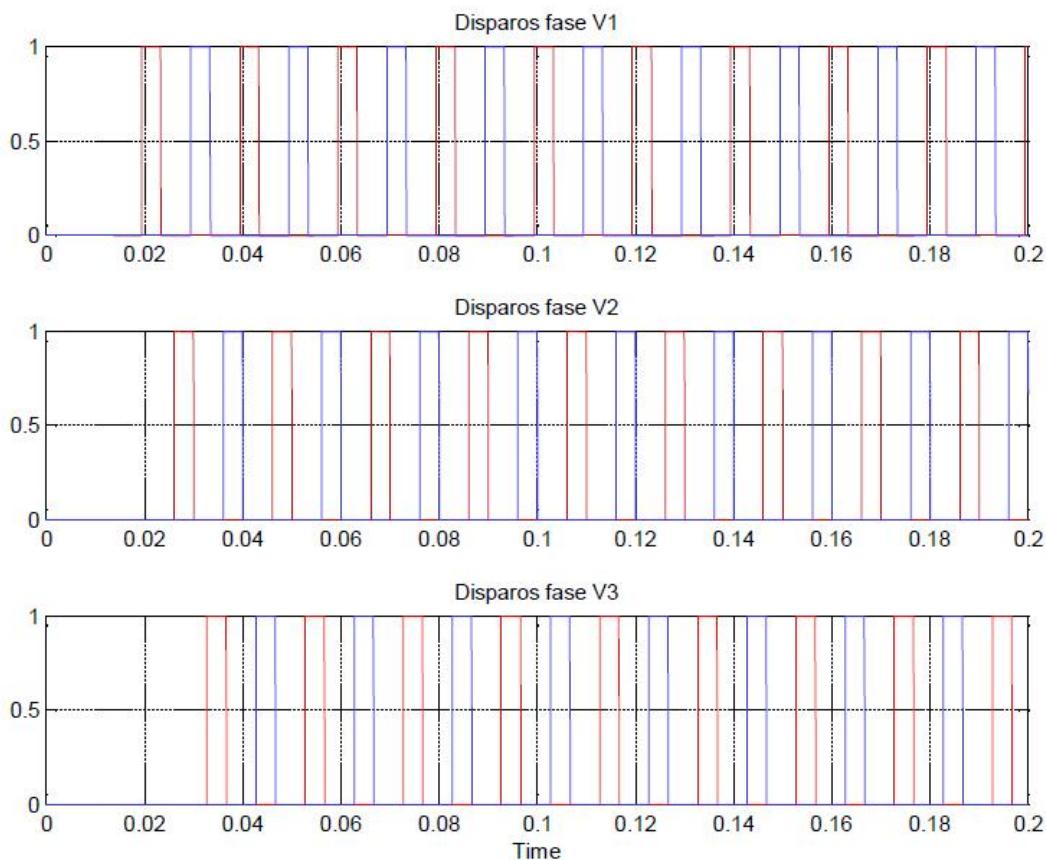


Figura 5.4. Disparos de los tiristores

En la figura 4.5 se pueden observar las formas de onda de los impulsos de disparo del graduador; en cada gráfica se muestran los disparos de cada rama. Los impulsos de color rojo corresponden a los disparos de los tiristores que conducen en los semiciclos positivos, y los de color azul a los disparos de los semiciclos negativos.

## 5.2 Graduador trifásico con carga óhmico-inductiva

Se ha realizado una simulación del comportamiento eléctrico de una carga óhmico-inductiva trifásica conectada en estrella y con neutro flotante, la cual es alimentada por un graduador trifásico a su vez alimentado por un sistema de tensiones trifásico, de 380 V de amplitud de la tensión de línea, de manera que la carga recibe un valor de tensión eficaz dependiente del ángulo de disparo de los tiristores del graduador. El motivo de haber realizado tal simulación radica en que el circuito equivalente de una máquina de inducción es de carácter inductivo, por lo cual esta simulación nos da una primera idea de como resultan ser las formas de onda de tensión y corriente introducidas por un graduador en una máquina asincrónica.

A continuación se muestra el modelado de este sistema:

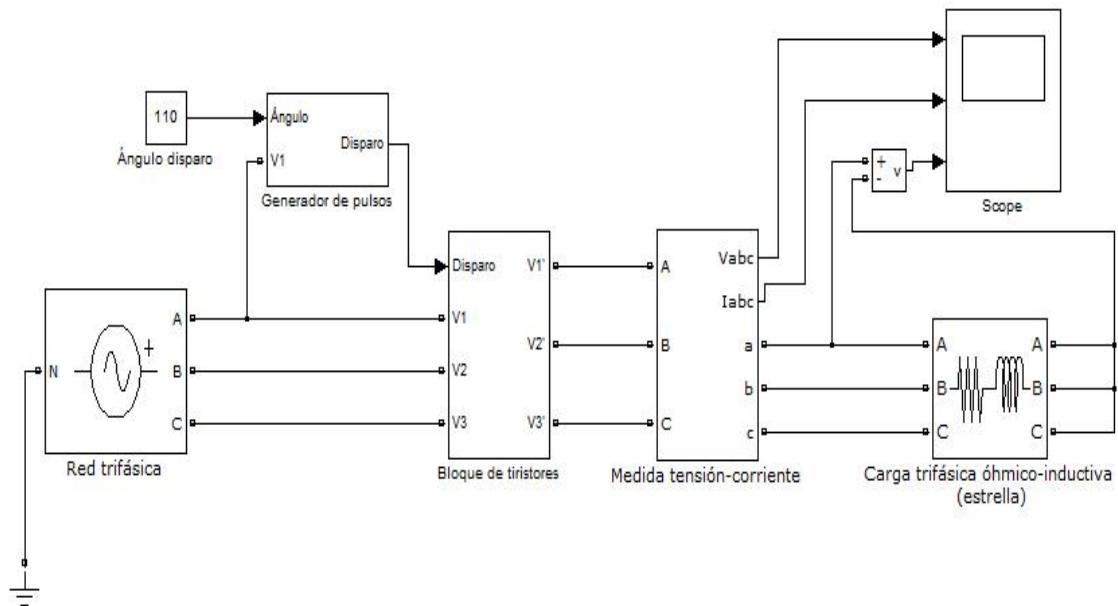


Figura 5.5. Modelado de una carga óhmico-inductiva regulada con graduador trifásico.

Para una adecuada comprensión de las formas de onda de corriente que circulan por la carga inductiva trifásica, previamente realizaremos un análisis de la forma de corriente en una carga inductiva monofásica alimentada con una tensión alterna sinusoidal y comutada a través de dos tiristores en antiparalelo. La expresión de la corriente en la carga bajo estas condiciones es de la forma siguiente:

$$i(t) = \frac{V}{Z} [\sin(\omega t + \psi + \varphi) - \sin(\psi - \varphi)e^{-t/\tau}]$$

[Ec. 5.2]

Donde:

V: Amplitud de la tensión alterna de entrada

Z: Módulo de la impedancia de la carga

$\omega = 2\pi f$  (f: frecuencia de la tensión alterna)

$\psi$ : Ángulo de disparo de los tiristores

$\varphi$ : Argumento de la impedancia de la carga

$\tau$ : Constante de tiempo de la carga  $R/L$

La expresión anterior se puede separar en dos términos. El primero corresponde a la componente de régimen permanente y el segundo a la componente de régimen transitorio. Si la corriente realiza un paso por cero antes de que se dispare el tiristor en oposición al que conduce los bucles de corriente que experimenta la carga nunca alcanzan el régimen permanente. Por el contrario, si al realizarse el disparo del tiristor en oposición la corriente no se ha extinguido, al cabo de unos pocos ciclos la componente transitoria se anula y la corriente circulante por la carga sólo tiene componente de régimen permanente, por lo que la corriente se hace continua y se pierde el control sobre la carga. La corriente no se extingue si  $\psi < \varphi$ , ya que en este caso la componente transitoria resulta positiva y la componente de régimen permanente comienza en el momento de disparo con un valor negativo tendente a cero. Ya que la componente de régimen permanente es de la frecuencia de la tensión alterna, esta componente, una vez que haya cruzado por cero, no volverá a anularse hasta el posterior semiciclo, lo que ocurre después del instante de disparo en ese semiciclo.

Por esta razón el ángulo de disparo siempre debe ser mayor al argumento de la carga conmutada, porque en caso contrario no se podrá controlar la corriente en la carga.

Cada fase de una carga óhmico-inductiva trifásica conectada en estrella con neutro referenciado a la masa de un sistema trifásico de tensiones que la alimenta y es controlada por un graduador trifásico experimenta la mismas formas de onda de corriente y tensión que una carga monofásica óhmico-inductiva conmutada por dos tiristores en antiparalelo y alimentada por una tensión alterna, de la forma que se acaba de explicar. Sin embargo, si esa misma carga trifásica no está referenciada a la masa del sistema trifásico, las formas de onda son diferentes.

Se va a analizar el comportamiento de una carga trifásica óhmico-inductiva conectada en estrella con neutro flotante controlada por graduador, ya que ésta nos dará una primera idea de como se comportan las máquinas asíncronas conmutadas por un graduador trifásico, cuyas bobinas estatóricas están conectadas en estrella y el neutro está sin referenciar a masa.

Los valores de la resistencia y de la inductancia de cada fase de la carga trifásica a analizar serán los siguientes:

$$R = 1 \Omega$$

$$L = 5 \text{ mH}$$

Por consiguiente, a una frecuencia de las tensiones de alimentación de  $f=50$  Hz, el valor de la impedancia será:

$$Z = 1 + 1,57j = 1,862 [57,5^\circ]$$

El argumento de la impedancia es de  $57,5^\circ$ , por tanto el rango del ángulo de disparo debe empezar en ese valor, ya que si se dispara el graduador con un ángulo de disparo menor la corriente será continua y se perderá la regulación.

Por otro lado se observa que a partir de  $120^\circ$  la conducción es nula, por motivos que en este mismo apartado se expondrán. De esta forma el rango del ángulo de disparo es el siguiente:

$$57,5^\circ \rightarrow 120^\circ$$

Cuando se realiza la simulación, se observa que las formas de onda de la corriente son distintas para dos tramos comprendidos en el rango del ángulo de disparo.

Primer tramo (57,5°-90°)

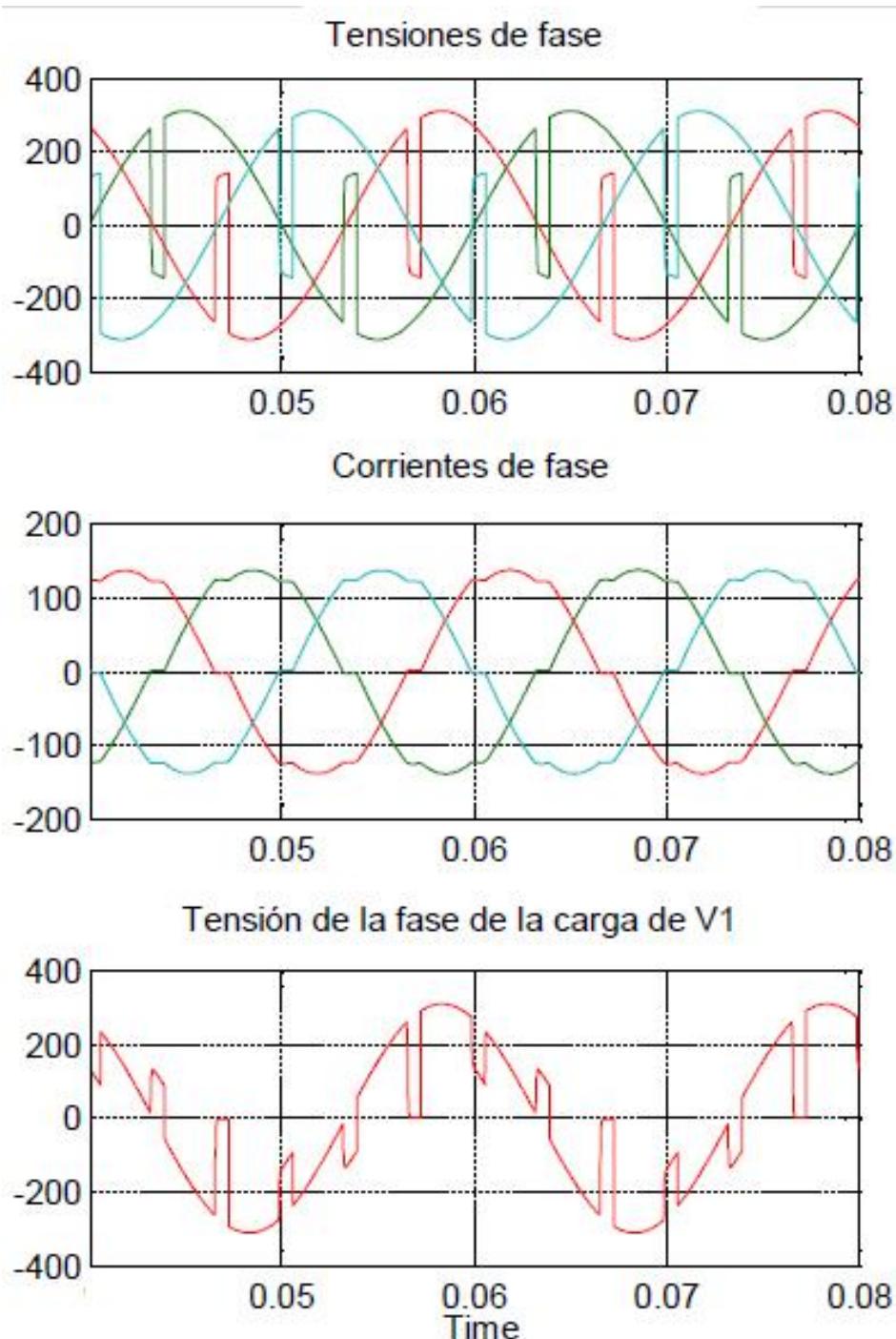


Figura 5.6. Ondas de corriente y tensión en carga R-L trifásica para  $\alpha=70^\circ$

En la figura 4.6 se muestran las formas de onda de tensión y corriente para un ángulo de disparo  $\alpha=70^\circ$ , que pertenece al primer tramo del rango.

La onda de corriente en este tramo debe su forma a la conducción de 2 o 3 fases. Cuando conducen las tres fases el resultado es equivalente al que presentaría la carga con su neutro conectado a la masa de las tensiones de alimentación. En el momento en que una fase deja de conducir por causa de la extinción de la corriente cuando ésta se anula, aísla de esta tensión de fase trifásica a la carga, siendo la tensión que cae en las otras dos fases la de línea, de amplitud 380 V, y en cada una de ellas la mitad de ésta. Debido a las distintas tensiones que experimentan las fases de la carga en función de la conducción de 2 o 3 de las fases, se originan distintos bucles de corriente.

#### Segundo tramo (90°-120°)

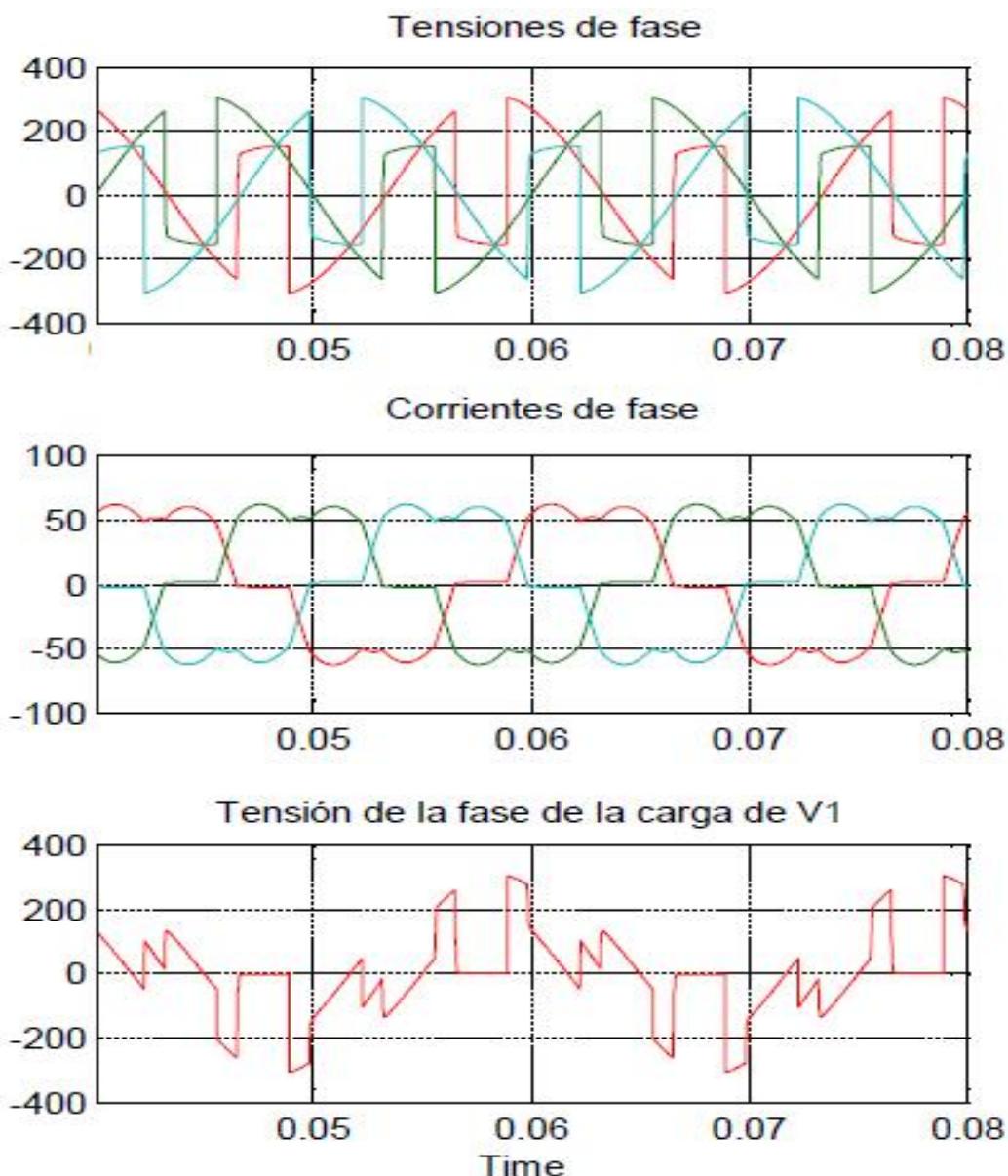


Figura 5.7. Ondas de tensión y corriente en carga R-L trifásica para  $\alpha=100^\circ$

La diferencia entre las formas de onda de la corriente en sendos tramos es debida a que cuando deja de conducir una de las fases, en este tramo del rango la tensión que cae en las otras fases que siguen en conducción es menor que en el instante que vuelven a conducir las tres fases, por lo tanto el bucle de corriente correspondiente a la conducción de dos fases es de menor amplitud que los correspondientes a la conducción de tres fases. Cabe resaltar que el máximo valor de corriente que se alcanza para estos ángulos de conducción es menor que para el anterior tramo del rango del ángulo de disparo, por lo que se constata que a medida que aumenta el ángulo de disparo el valor de corriente eficaz de fase disminuye.

A partir de un ángulo de disparo de  $120^\circ$  no circula corriente por la carga. Para comprender por qué ocurre esto analizaremos la forma de onda de la corriente por las fases para un ángulo de disparo  $\alpha=119^\circ$ .

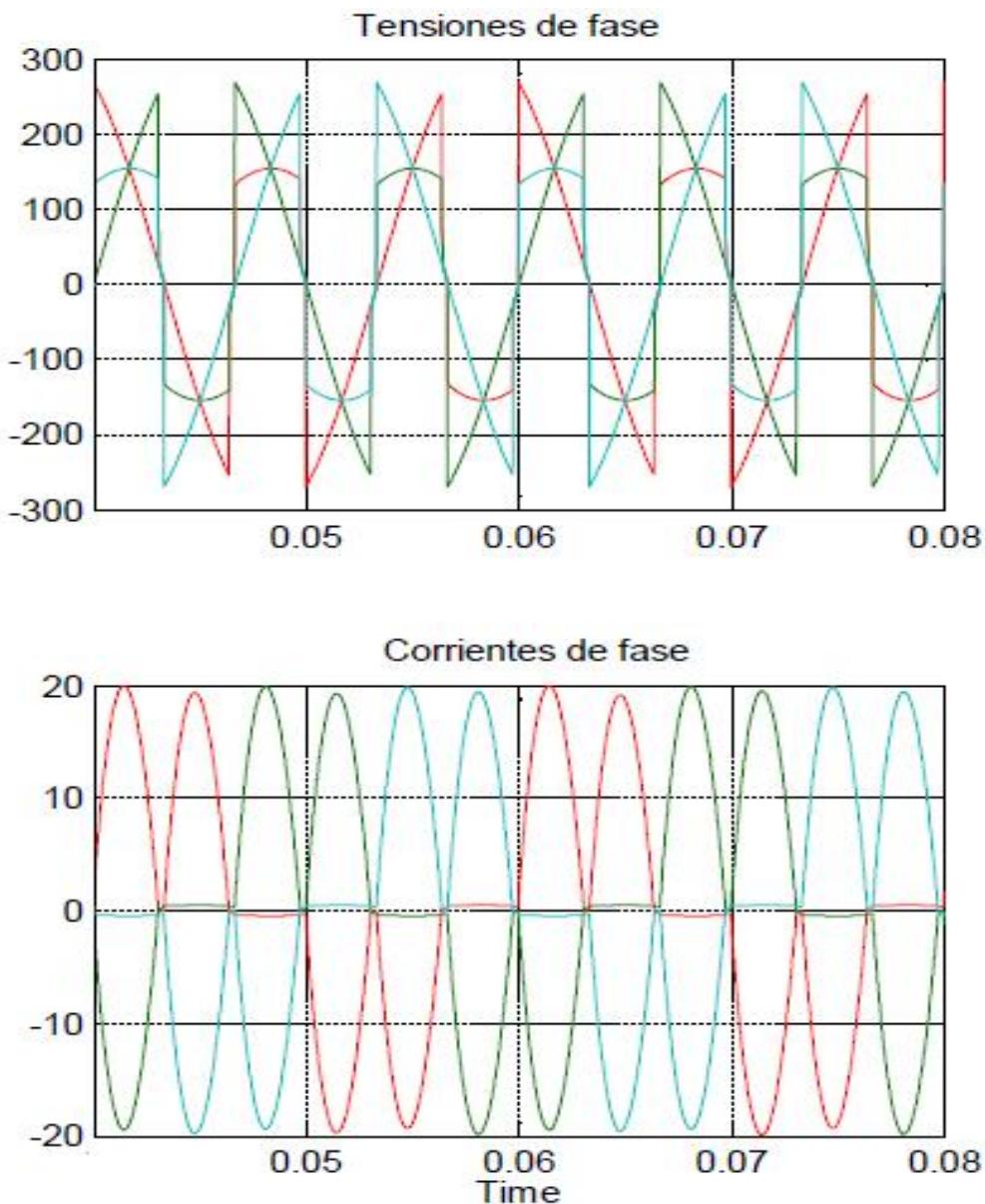


Figura 5.8. Ondas de tensión y corriente en carga R-L trifásica para  $\alpha=119^\circ$

Observamos en la figura que cuando dispara un tiristor la corriente que circula por las otras fases es muy reducida; por una de las fases sólo circula corriente a través de la red snubber del correspondiente tiristor y por la otra, la corriente circulante por el tiristor de conducción inversa a la del tiristor disparado está muy cercana a cero en el momento del disparo. En un caso hipotético, con ángulos de disparo mayores a  $120^\circ$  esa corriente se anularía antes del disparo de los tiristores, por tanto aunque cada tiristor dispara no circula corriente por ningún otro tiristor, sino por las redes snubbers de éstos, de impedancia elevada para que no produzcan efecto en la simulación, así que la corriente circulando por la carga es de muy pequeño valor.

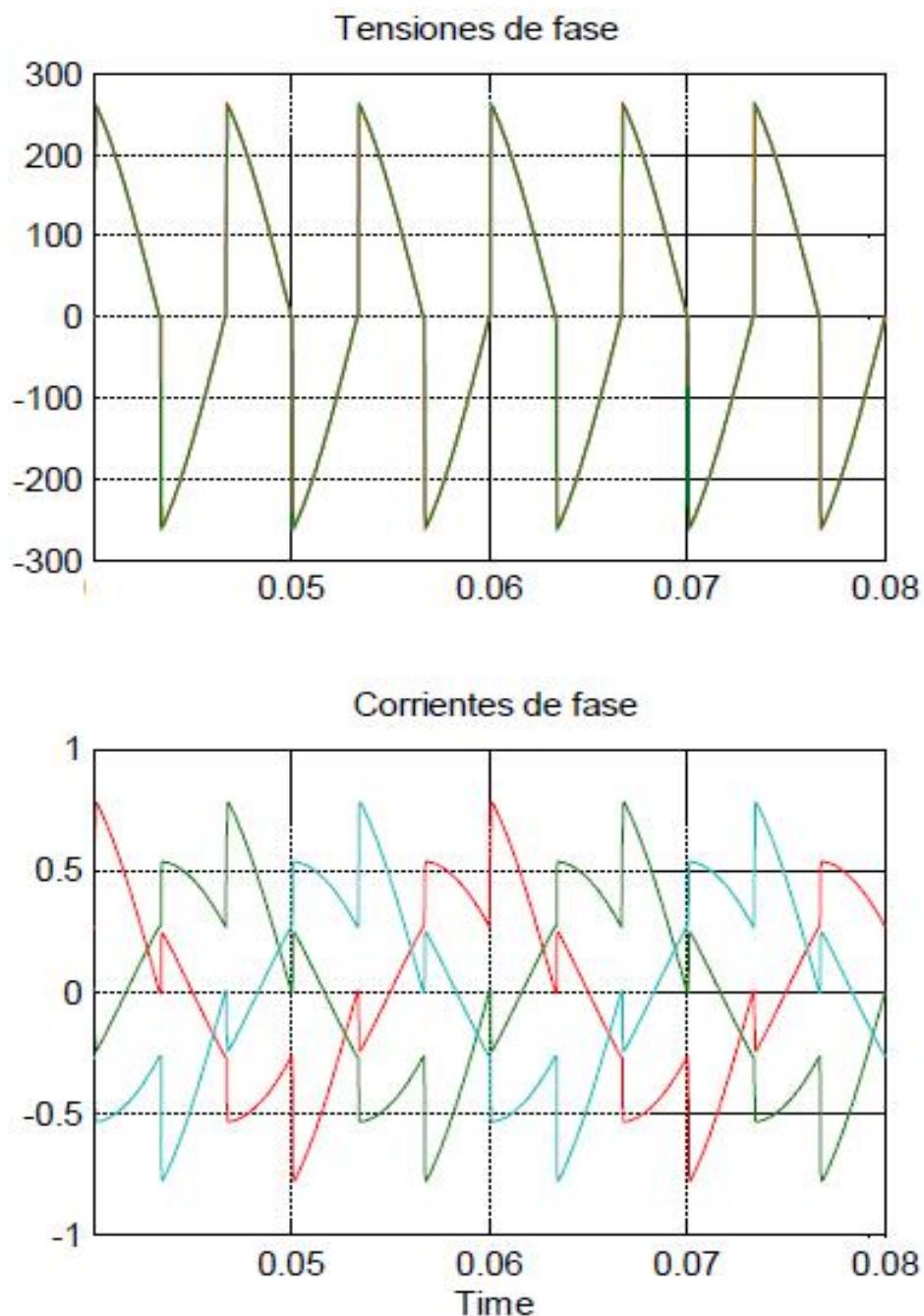


Figura 5.9. Ondas de tensión y corriente en Carga R-L trifásica para  $\alpha=121^\circ$

La figura 5.9 nos muestra las ondas de tensión en la carga para  $\alpha=121^\circ$ , pudiéndose apreciar que la tensión del punto de conexión de las cargas con respecto a la masa del sistema son prácticamente idénticas. Esto es debido a que las corrientes en la carga son muy reducidas ya que son originadas por las redes snubber, por consiguiente la caída de tensión no es significativa.

### 5.3 Graduador bifásico con carga óhmico-inductiva

El modelado del graduador bifásico es idéntico al del graduador trifásico, salvo que una de las fases no es controlada por tanto carece de tiristores, por este motivo la entrada de esa fase al bloque del graduador esta unida mediante un hilo conductor a la salida.

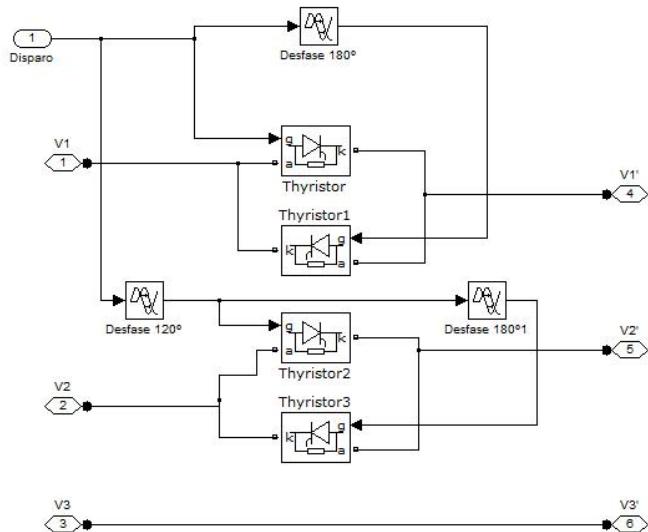


Figura 5.10. Graduador bifásico.

Conectamos el graduador bifásico a la misma carga óhmico-inductiva que conectábamos el graduador trifásico. En esta tesisura, aplicando ángulos de disparo al graduador mayores a  $120^\circ$  y menores a  $180^\circ$ , observamos que circula corriente por la carga, a diferencia que en el graduador trifásico. Al tratarse de la misma carga, el rango del ángulo de disparo comienza en el mismo ángulo,  $\alpha=57,5^\circ$ .

Por tanto, el rango del ángulo de disparo está comprendido entre  $57,5^\circ$  y  $180^\circ$ .

$$57,5^\circ \rightarrow 180^\circ$$

A medida que va aumentando el ángulo de disparo dentro del rango la corriente eficaz en la fase V2 va disminuyendo y la corriente eficaz en la fase V2 va disminuyendo. Como la tercera fase no está controlada, por tanto la tensión en esta fase es igual a la de la alimentación, cuando dispara uno de los tiristores de la fase V1 la tensión en bornes de la fase de la carga resulta ser mayor que para el mismo instante cuando se controla la carga mediante el graduador trifásico.

Esto implica que el bucle de corriente tiene mayor amplitud y es más duradero, así que en el momento en que esta corriente se anula, la tensión en bornes de la fase de la carga entre V2 y el neutro de la carga, que corresponde a la mitad de la tensión de línea del sistema trifásico de tensiones, es menor que cuando se anula la corriente de V1 en el caso del graduador trifásico, lo que conlleva a un bucle de corriente de menor duración y amplitud.

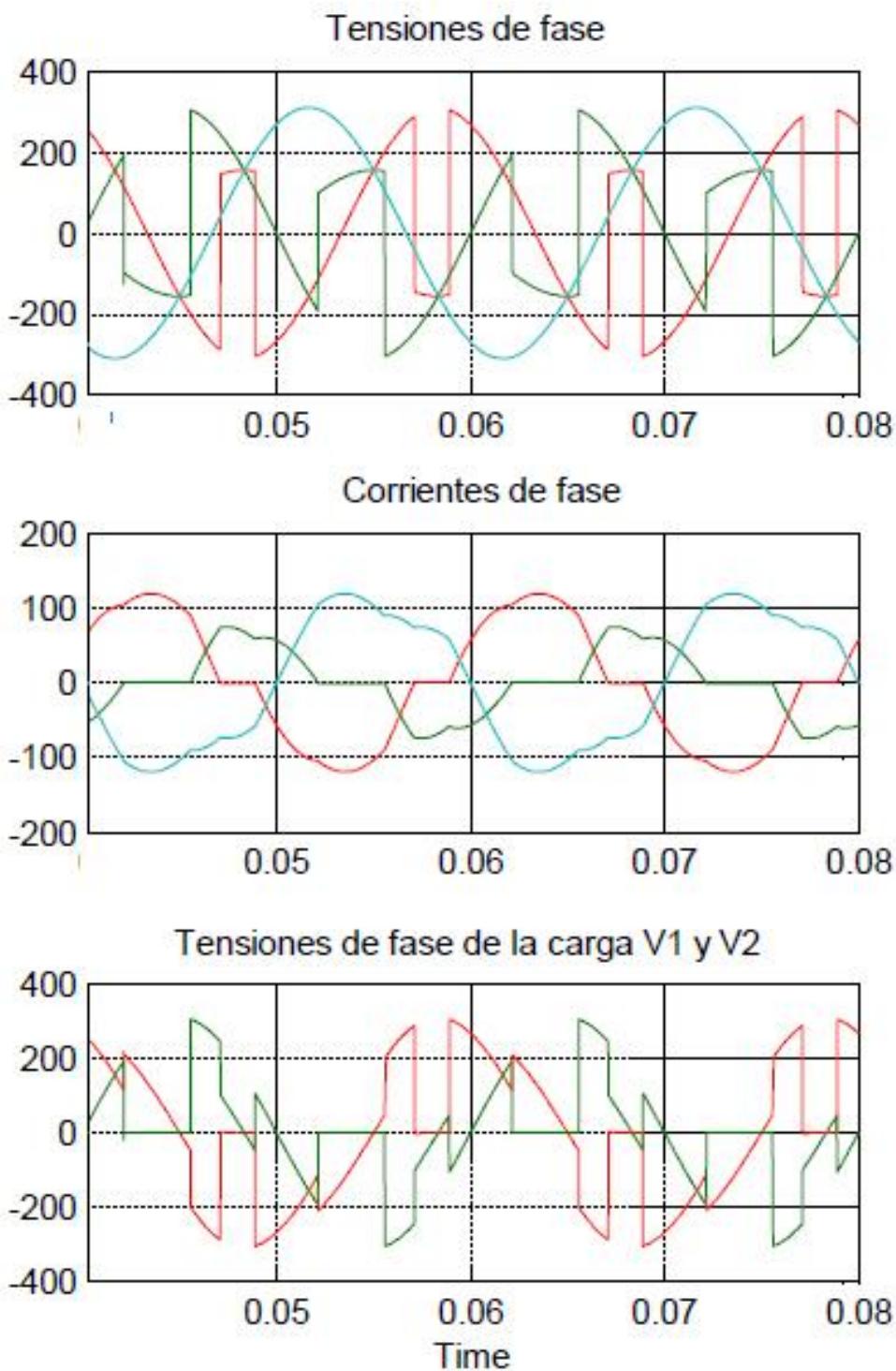


Figura 5.11. Ondas de tensión y corriente en carga R-L con graduador bifásico para  $\alpha=100^\circ$

La corriente que circula por la fase no controlada es la suma de las corrientes de las otras dos fases. Ésta siempre es continua, ya que aunque una de las otras corrientes se anule la otra no lo hace. Como las corrientes de las fases controladas retornan por la fase no controlada, siempre circula corriente por esta última. Por otro lado, como las corrientes tienen habilitado un camino de retorno continuo, el rango del ángulo de disparo no está limitado a  $120^\circ$  y de esta manera circula corriente por la carga hasta un ángulo de  $180^\circ$ .

Conforme se aumenta el ángulo de disparo la corriente en la fase V2 es cada vez de menor magnitud. Para un ángulo de disparo de  $\alpha=145^\circ$ , cuando disparan los tiristores de la fase V2 la tensión en bornes entre el punto de conexión con el graduador y el neutro de la fase de la carga es de reducido valor, por tanto la corriente que circula por esta fase en estas condiciones es prácticamente nula.

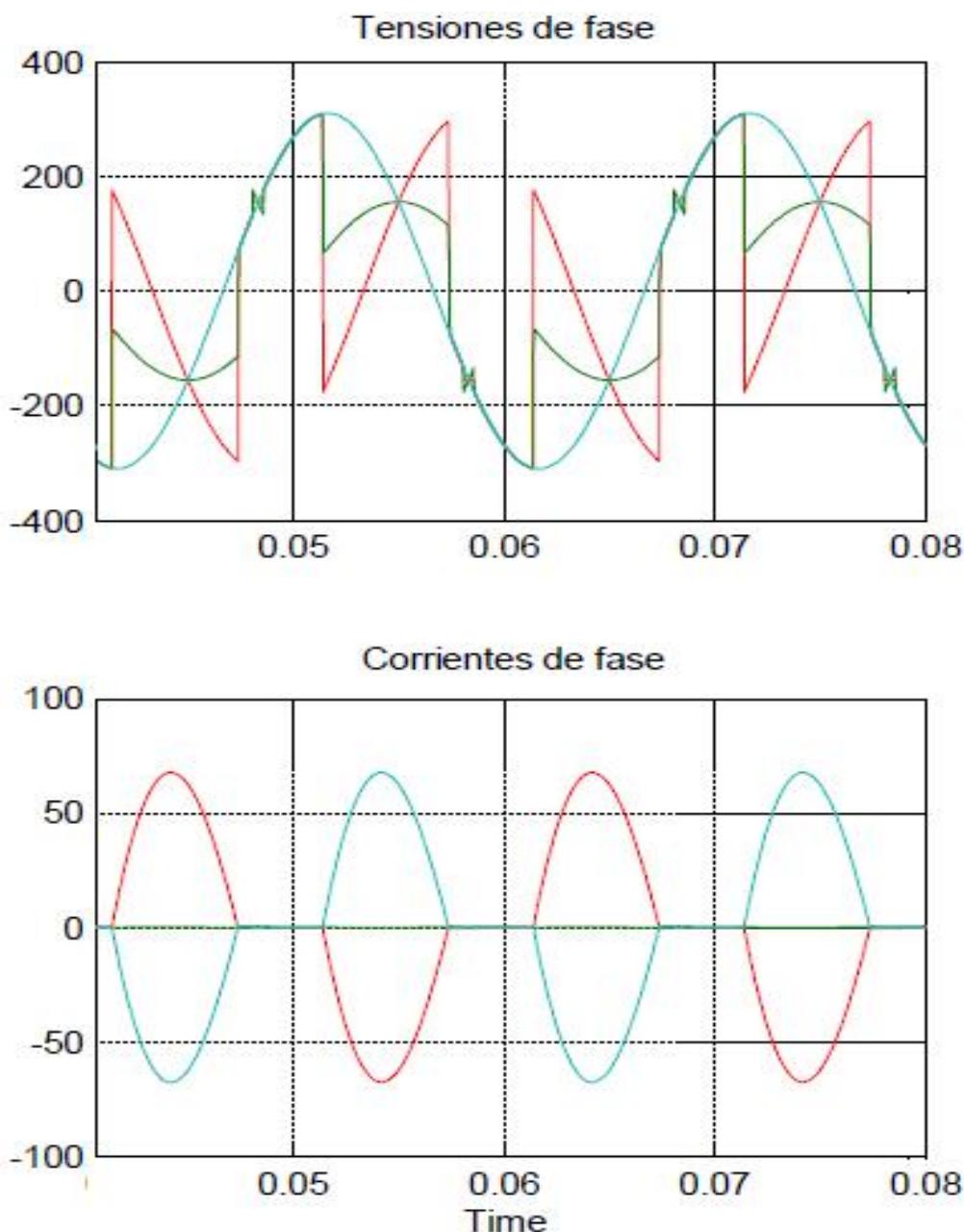


Figura 5.12. Ondas de tensión y corriente en carga R-L con graduador bifásico para  $\alpha=145^\circ$

En vista de estos resultados, podemos afirmar que para un amplio intervalo del rango de operación del ángulo de disparo las corrientes trifásicas están desequilibradas para una carga inductiva. Únicamente son similares en el intervalo comprendido entre  $60^\circ$  y  $70^\circ$ , a partir de este último ángulo de disparo las corrientes por cada fase difieren. Por otro lado, para un mismo ángulo de disparo las corrientes que se originan cuando se controla la carga con un graduador bifásico son de mayor magnitud que las corrientes resultantes cuando se utiliza un graduador trifásico, tal y como podemos denotar comparando las corrientes de la figura 5.7 y las de la figura 5.11.

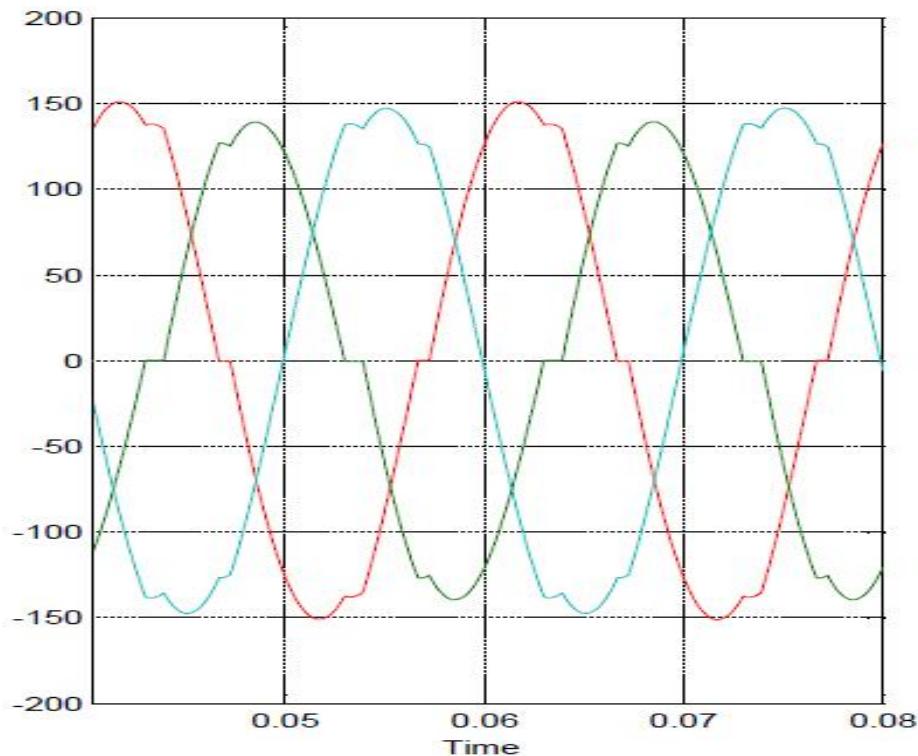


Figura 5.13. Ondas de corriente en carga R-L con graduador bifásico para  $\alpha=70^\circ$

## 5.4 Máquina asíncrona

### 5.4.1 Parámetros del generador

Para realizar el modelado del sistema de generación eólica se precisa de los parámetros característicos del generador cuya operación va ser simulada. Ya que no se dispone de los parámetros de este generador, se realiza una aproximación de los mismos a partir de otra máquina asíncrona, propiedad de la empresa GPS, de la que si se dispone de una información completa.

Esta aproximación se basa en la obtención de los valores de las resistencias rotóricas y estatóricas, y de las inductancias de dispersión y de magnetización por unidad de las máquinas cuyos parámetros conocemos, para posteriormente multiplicarlos por el valor de la impedancia base de los generadores que nos atañen y de este modo obtener los valores aproximados de los parámetros.

La máquina de partida de la cual obtendremos los parámetros del circuito equivalente del generador cuyo funcionamiento se ha simulado tiene una potencia nominal de 22 kW, cuyas características son las siguientes:

#### Generador de 22 kW

$$P_n = 22 \text{ kW}$$

$$U_n = 660/380 \text{ V}$$

$$I_n = 24/42 \text{ A}$$

$$R_1 = R'_2 = 0,572 \Omega$$

$$X_1 = X'_2 = 1,217 \Omega$$

$$X_m = 40,182 \Omega$$

Conocidos los parámetros de esta máquina, el siguiente paso es calcular los del generador simulado del aerogenerador a partir de las impedancias por unidad obtenidas de los parámetros de los que disponemos.

#### Generador de 30 kW

Los parámetros de este generador van a ser obtenidos a partir de los del generador de 22 kW. En primer lugar deberemos conocer la impedancia base por fase de este último:

$$Z_{f \text{ base} 1} = \frac{U_{fn1}}{I_{fn1}} = \frac{380}{24} = 15,8 \Omega$$

Una vez obtenido este valor, calculamos los valores por unidad de la impedancia de base de los parámetros del generador de 22 kW:

$$R_{1 \text{ p.u.}} = R'_{2 \text{ p.u.}} = \frac{0,572}{15,8} = 0,0362$$

$$X_{1 \text{ p.u.}} = X'_{2 \text{ p.u.}} = \frac{1,217}{15,8} = 0,077$$

$$X_{m \text{ p.u.}} = \frac{40,182}{15,8} = 2,543$$

Por último, multiplicando los valores obtenidos por unidad a la impedancia base del generador de 30 kW, se consiguen los valores de los parámetros requeridos:

$$Z_{f \text{ base } G} = \frac{U_{fnG}}{I_{fnG}} = \frac{220}{52,39} = 4,2 \Omega$$

$$R_{1G2} = R'_{2G} = 0,0362 \times 4,2 = 0,152 \Omega$$

$$X_{1G} = X'_{2G} = 0,077 \times 4,2 = 0,323 \Omega$$

$$X_{mG} = 2,543 \times 4,2 = 10,68 \Omega$$

Los valores de las inductancias de dispersión y magnetización, según las reactancias calculadas son:

$$X_{1G} = 100\pi L_{1G} \Rightarrow L_{1G} = L'_{2G} = 1,03 \text{ mH}$$

$$X_{mG} = 100\pi L_{mG} \Rightarrow L_{mG} = 34 \text{ mH}$$

#### 5.4.2 Simulación del funcionamiento como motor

En este apartado constataremos la similitud de las ondas de corriente que se obtienen en una máquina asincrónica cuando ésta es conmutada por un graduador trifásico con las que se obtienen conmutando con graduador una carga inductiva trifásica.

Para ello, se ha realizado un modelado en el que se incluye un sistema trifásico de tensiones, un graduador trifásico y un motor asincrónico, mostrado en la figura 5.14.

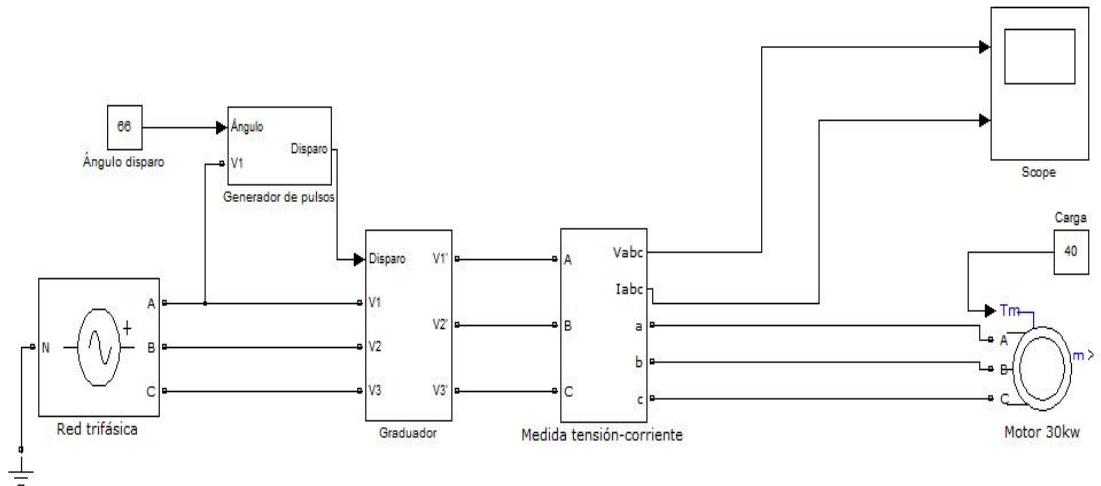


Figura 5.14. Modelado de una máquina asincrónica controlada con graduador trifásico, en funcionamiento como motor.

Para esta simulación se han introducido en el modelo de la máquina asincrónica proporcionado por SIMULINK los parámetros que han sido calculados de G2, generador de 30 kW. Este modelo de máquina asincrónica interpreta funcionamiento como motor de la máquina si se le aplica una carga de valor positivo. En esta simulación la carga aplicada es de 40 N.m.

En primer lugar se debe analizar a partir de qué ángulo de disparo la corriente absorbida por el motor no es continua.

Se observa que para un ángulo de  $66^\circ$  el disparo de los tiristores resulta efectivo ya que la corriente no se hace continua, y para un ángulo de  $65^\circ$  el disparo no tiene efecto sobre los tiristores y la corriente por la máquina no puede ser regulada.

En la figura 5.15 se muestran las ondas de corriente y de tensión de las tres fases del motor para un ángulo de disparo de  $66^\circ$ , donde se puede apreciar que la corriente es prácticamente continua y que las tensiones en bornes de las fases del motor son muy similares a las trifásicas de alimentación. Por otro lado cabe apuntar que las corrientes mostradas en esta figura no son las correspondientes al funcionamiento del motor en régimen permanente, sino que corresponden al arranque de la máquina, por ello el valor de éstas resulta ser de gran magnitud en comparación con las absorbidas por la máquina en régimen permanente.

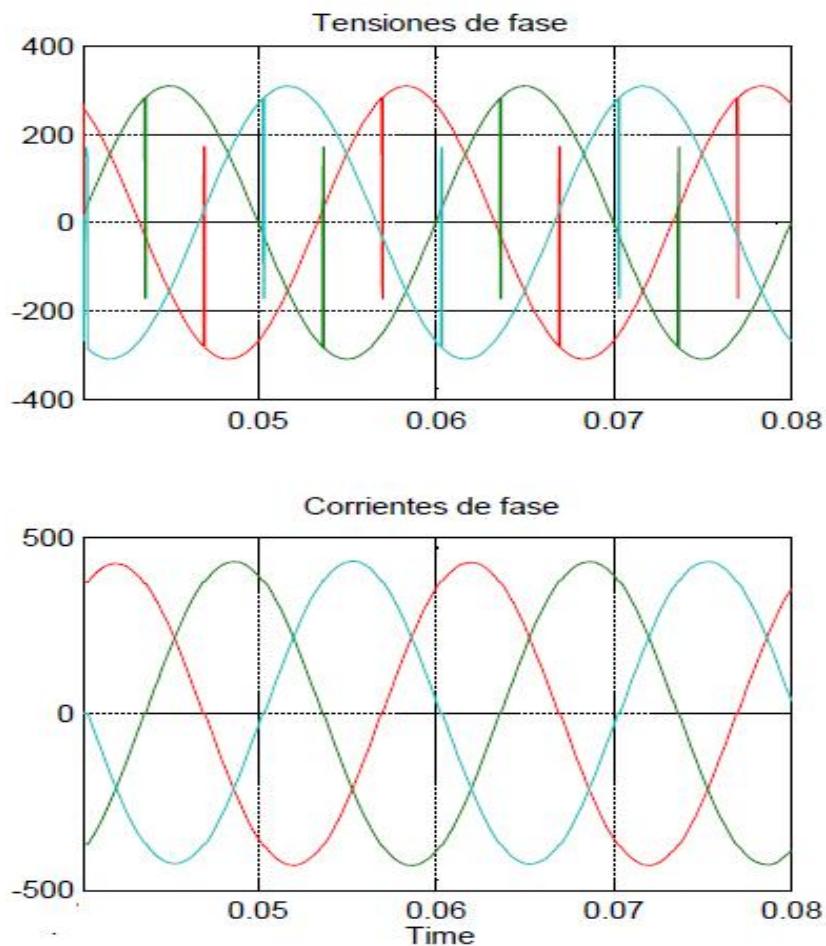


Figura 5.15. Ondas de tensión y corriente de fase en un motor asincrónico conmutado por graduador, para  $\alpha=66^\circ$

Conforme se aumenta el ángulo de disparo las tensiones y corrientes eficaces que experimenta el motor son cada vez inferiores, tal y como ocurría con la carga óhmico-inductiva. En las figuras 5.16 y 5.17 se exponen las formas de onda de tensión y corriente en el motor para ángulos de disparo de  $100^\circ$  y  $120^\circ$ , respectivamente.

Observamos que la forma de onda de las corrientes para  $\alpha=100^\circ$  es similar a la homóloga en carga inductiva regulada por graduador trifásico.

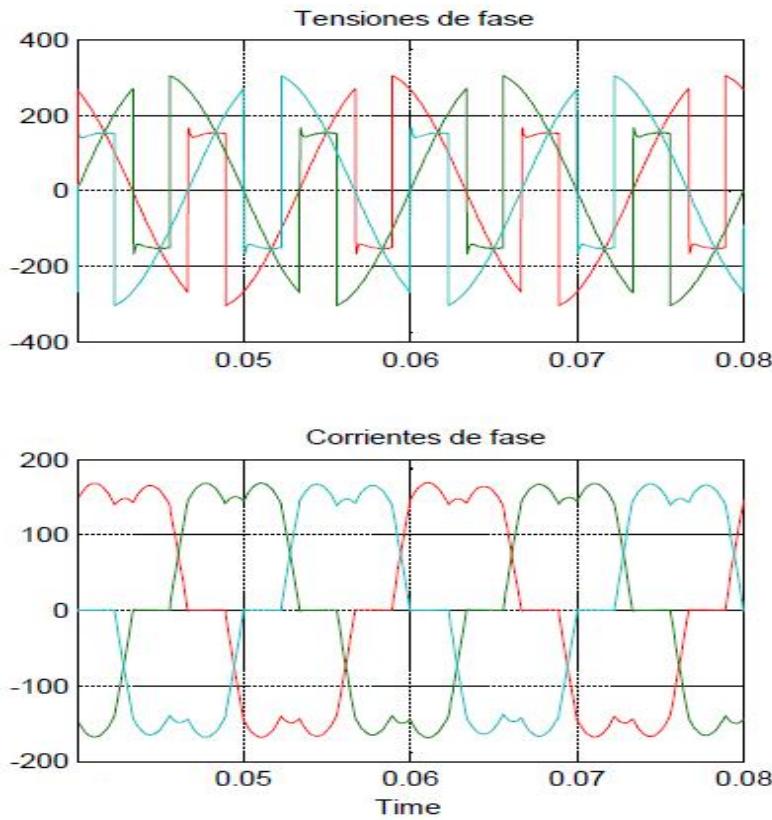


Figura 5.16. Ondas de tensión y corriente en motor asíncrono para  $\alpha=100^\circ$

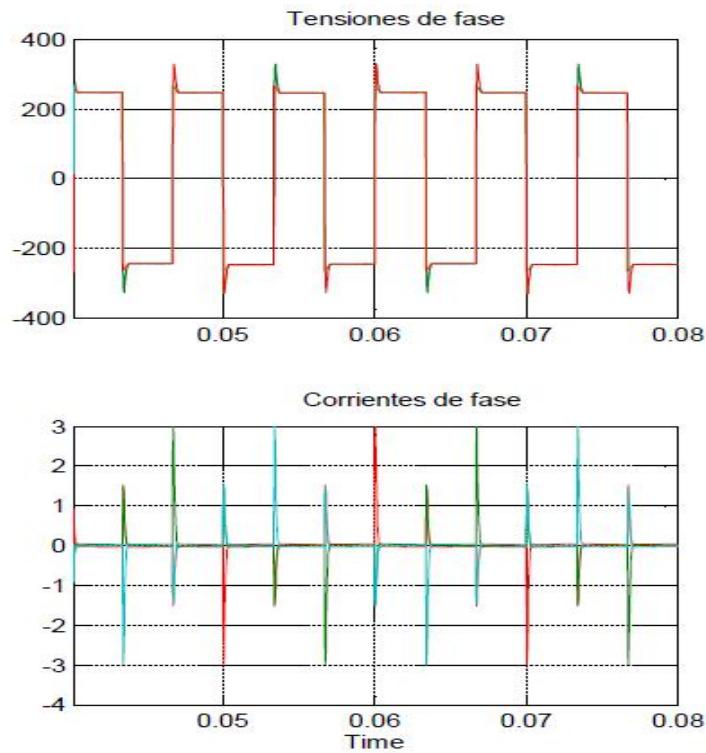


Figura 5.17. Ondas de tensión y corriente en motor asíncrono para  $\alpha=120^\circ$

Se puede apreciar en la figura 5.16 una pequeña sobreoscilación en la tensión de cada fase cuando uno de sus tiristores deja de conducir. Ésta es producida por las redes snubber de los tiristores, las cuales evitan disparos indeseados de los tiristores por el efecto  $dv/dt$ . Los valores de la resistencia y de la capacidad de las redes snubber, colocadas en paralelo con cada pareja de tiristores y utilizados en esta simulación son  $R_s = 500 \Omega$  y  $C_s = 0,2 \mu F$ .

La figura 5.17 nos muestra las tensiones y corrientes para un ángulo de disparo de  $120^\circ$ . Como ya se ha comentado para la carga óhmico-inductiva, a partir de este ángulo de disparo los tiristores no conducen. La corriente que circula por la carga es debida a las redes snubber; los condensadores de éstas comienzan a cargarse cuando se produce el disparo de los tiristores hasta que se cargan todos a la misma tensión, momento en el que cesa la conducción y los condensadores permanecen cargados a un valor constante.

## 5.5 Aerogenerador

La simulación del aerogenerador, el cual pretende ponerse en funcionamiento tras la finalización de este proyecto, se realiza mediante la herramienta SIMULINK del programa MATLAB y tendrá en cuenta la conexión a red del generador de 30 kW, realizada mediante un graduador trifásico, la compensación de energía reactiva mediante la correspondiente batería de condensadores que han sido elegidas para tal efecto y el funcionamiento del aerogenerador en régimen permanente para distintas velocidades de viento.

El modelo del graduador trifásico que suaviza la conexión a red será el mismo que el utilizado para las anteriores simulaciones de carga inductiva y de máquina asincrónica funcionando como motor, con la salvedad de que se simulará el puenteo de los tiristores mediante un interruptor derivante, el cuál se realizará una vez que la tensión en bornes del generador resulte ser la misma que la de alimentación. En este caso el arrancador no recibirá un ángulo de disparo fijo sino que se le aplicará una rampa decreciente de ángulos de disparo, para que la tensión en el momento de conexión en el generador sea gradualmente creciente.

Para hacer posible la simulación se deberá realizar un modelado del rotor eólico y del sistema de transmisión, el cuál proporcionará el par que experimentará el generador correspondiente en su eje para producirse la generación de potencia eléctrica.

Asimismo se diseñará un modelado de los bancos de condensadores, que actuarán cuando la tensión eficaz de las tensiones de fase del aerogenerador sea igual a la tensión eficaz de las tensiones de fase del sistema trifásico de alimentación.

A continuación se muestra el modelado del sistema generador, con sus respectivos subsistemas, los cuales van a ser analizados y explicados a lo largo de este apartado.

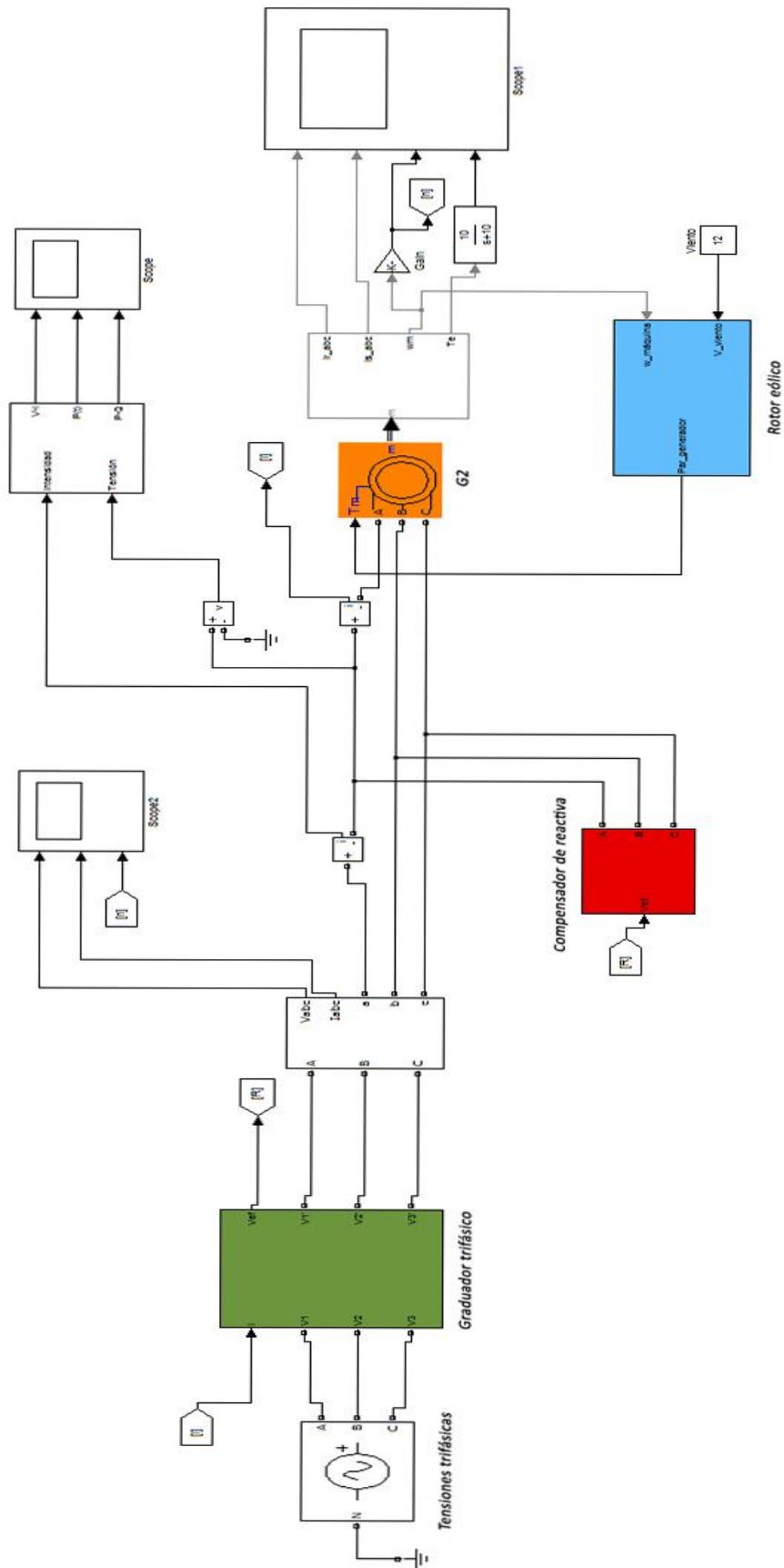


Figura 5.18. Modelado del aerogenerador

### 5.5.1 Rotor eólico

El modelado del rotor eólico es uno de los subsistemas del modelo del aerogenerador. Este subsistema consta de dos entradas, por las que se introducirán al sistema la velocidad de viento a la que se quiera realizar la simulación y la velocidad angular del generador. La salida de este bloque comunica el par ejercido por la turbina sobre el eje del generador.

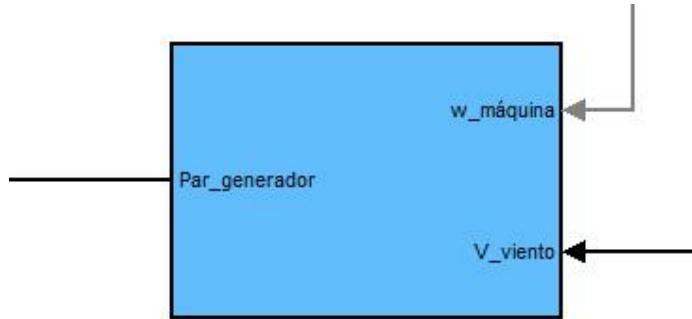


Figura 5.19. Bloque del rotor eólico.

El modelo de la turbina se muestra en la figura 5.20.

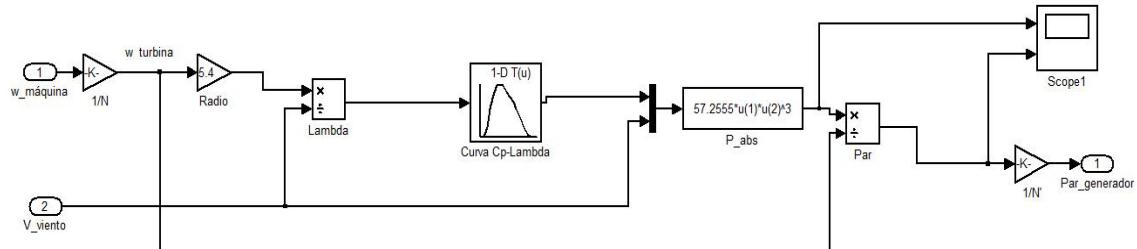


Figura 5.20. Modelo del rotor eólico.

La estrategia que se ha seguido para, a partir de la velocidad de viento que entra al sistema y la velocidad angular del generador, obtener el par correspondiente a estas variables es la siguiente:

En primer lugar el modelo deberá calcular la velocidad específica  $\lambda$ . Para ello primero se divide la velocidad angular de la máquina por la relación de multiplicación,  $N=20,26$ , dato obtenido de la información expuesta en el capítulo 1, para así calcular la velocidad angular en la turbina.

$$\omega_{turbina} = \frac{\omega_{generador}}{20,26}$$

El siguiente paso consiste en la obtención de la velocidad de punta de la pala, la cuál se obtiene multiplicando el radio del rotor, de valor  $R=5,4$ , por la velocidad angular del mismo:

$$V_{punta} = \omega_{turbina} \cdot 5,4$$

Con este valor se puede obtener la velocidad específica ya que ésta resulta de la división de la velocidad de punta de pala y la velocidad de viento incidente:

$$\lambda = \frac{V_{punta}}{V_{viento}}$$

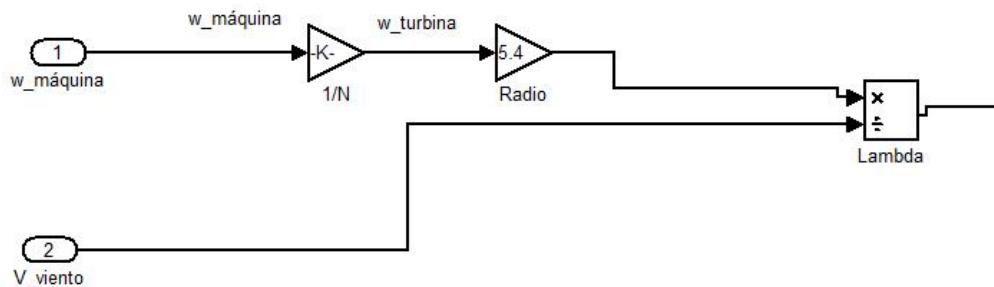


Figura 5.21. Obtención de lambda.

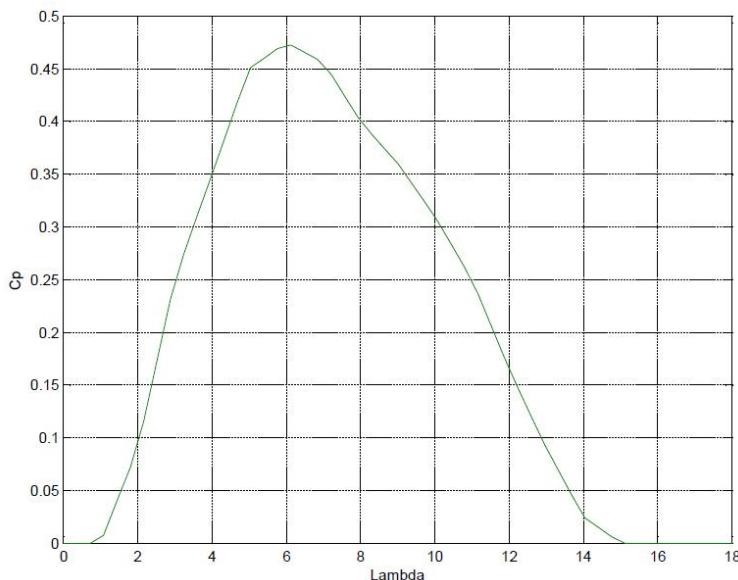
Una vez obtenida la velocidad específica ésta se introducirá en una función  $C_p$ -lambda para así conseguirse el valor del coeficiente de potencia. Dado que no se dispone de la curva  $C_p$ -lambda del aerogenerador y los únicos datos con los que se cuenta son el coeficiente de potencia máximo, cuyo valor es  $C_{pMáx} = 0,475$ , y la velocidad específica óptima,  $\lambda_{opt}=6$ , se obtendrá la curva para el modelado a partir de la comparación con una curva real, estableciendo como valor máximo de  $C_p=0,475$  y desplazando la curva a  $\lambda_{opt}=6$ .

La tabla de valores de lambda y los valores del coeficiente de potencia que corresponden a éstos, la cual es introducida en el modelado, es la siguiente:

$\lambda$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$C_p$	0	0	0,09	0,25	0,37	0,456	0,475	0,456	0,4

$\lambda$	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$C_p$	0,36	0,32	0,25	0,165	0,09	0,025	0	0	0

Tabla 5.1. Valores de la curva  $C_p$ - $\lambda$ .

Figura 5.22. Curva  $C_p$ - $\lambda$ .

La obtención de la potencia mecánica absorbida por la turbina se realiza por medio de la ecuación de la potencia captada por un aerogenerador:

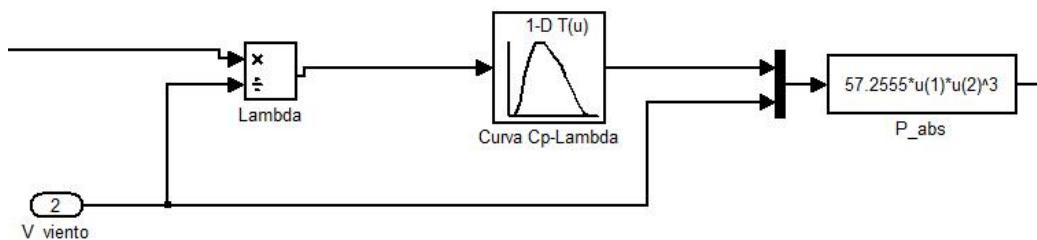
$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_v^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

[Ec. 5.3]

Si consideramos la densidad del aire con un valor de  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ , y teniendo en cuenta que el diámetro del rotor es de 10,8 m, la potencia absorbida en función del coeficiente de potencia y de la velocidad de viento resulta:

$$P_m = 57,255 \cdot C_p \cdot V_v^3$$

Para que el modelo calcule la potencia absorbida, se inserta un bloque de función con dos entradas, que harán las veces de variables, en las cuales se establecen la velocidad de viento y la salida de la curva  $C_p$ - $\lambda$ . A este bloque se le adjudica la expresión anterior de potencia mecánica.

Figura 5.23. Obtención de  $C_p$  y  $P_{abs}$ .

Obtenida la potencia captada, el siguiente paso es calcular el par que experimenta el rotor eólico. Para ello tendremos en cuenta que la potencia es directamente proporcional a la velocidad angular y al par desarrollado:

$$P_{abs} = \omega_{turbina} \cdot M_{turbina}$$

[Ec. 5.4]

Por tanto, el par mecánico ejercido en la turbina resulta de la división del resultado del bloque que obtiene la potencia captada y la velocidad angular de la turbina. Por último se divide el par ejercido en la turbina por la relación de multiplicación, para así obtener a la salida del bloque el par que se ejercerá sobre el eje del generador. Este par debe ser negativo, ya que el modelo de la máquina asincrónica que proporciona SIMULINK interpreta como par generador en vez de carga arrastrada pares mecánicos con signo negativo.

$$M_{generador} = \left( -\frac{1}{20,26} \right) \cdot M_{turbina}$$

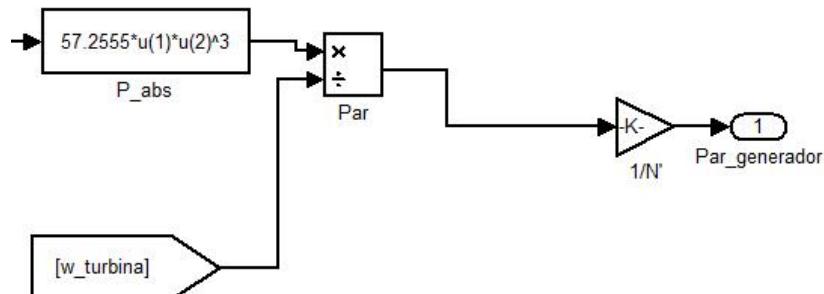


Figura 5.24. Obtención del par del generador.

### 5.5.2 Graduador trifásico

Como ya se ha comentado, el bloque correspondiente a los tiristores de potencia del modelo del graduador en la simulación de la máquina asincrónica trabajando como generador será igual que el utilizado para la carga inductiva y la máquina asincrónica en funcionamiento como motor. Además de este subsistema, en el modelado del graduador en la simulación del aerogenerador se incluye un bloque de control que proporciona una rampa decreciente de ángulos de disparo con un limitador de intensidad, además de un interruptor tipo contactor que hace la función de puenteo cuando se termina el arranque.

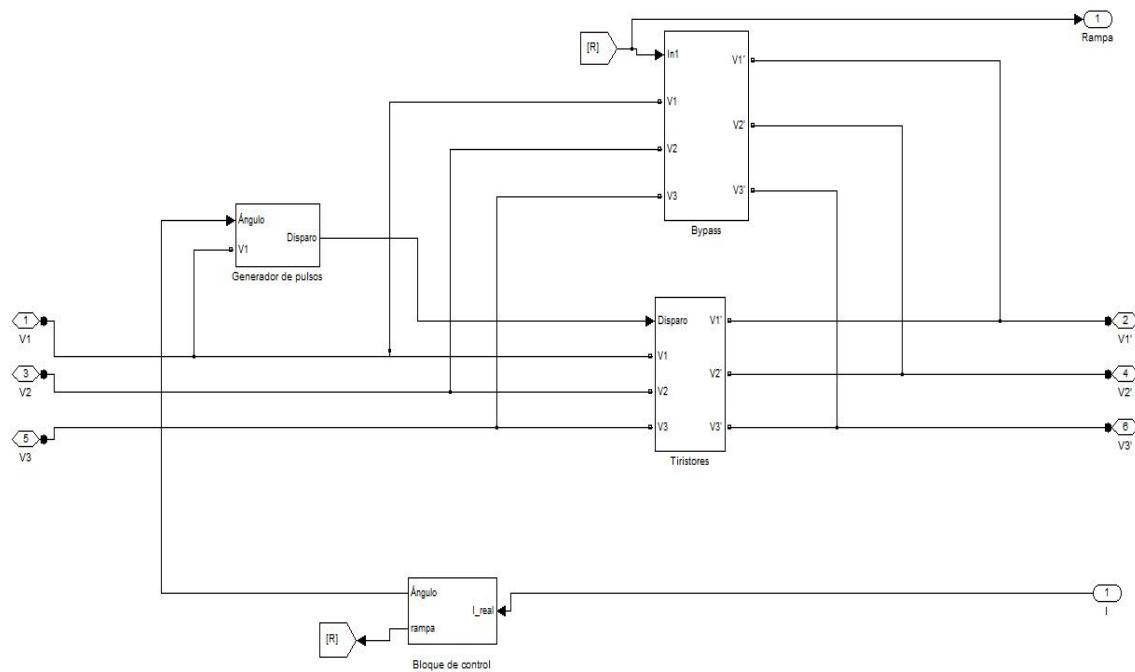


Figura 5.25. Diagrama de bloques del graduador trifásico

### Bloque de control

La finalidad de utilizar un arrancador estático en el aerogenerador es que la conexión del generador al sistema trifásico de tensiones sea de manera suavizada, es decir, aplicándose una tensión en bornes del generador gradualmente creciente.

Si no fuera así y se aplicara directamente la tensión de alimentación, se produciría una absorción brusca y elevada de corriente. En el modelo realizado del graduador se ha simulado una rampa de ángulo de disparo decreciente en el tiempo.

Esta rampa comenzará en un ángulo de disparo de  $120^\circ$ , ya que es el ángulo límite de conducción de los tiristores, tal y como se analizó en la simulación de la máquina asincrónica en funcionamiento como motor. El ángulo alcanzado al final de la rampa será de  $60^\circ$ , valor para el cual las tensiones de las fases del generador son iguales a las de alimentación.

Por último estableceremos el tiempo de la rampa, el cual será de 2 segundos. El bloque de control cuenta asimismo con un limitador de intensidad. El modelado de éste se muestra en la figura 5.26.

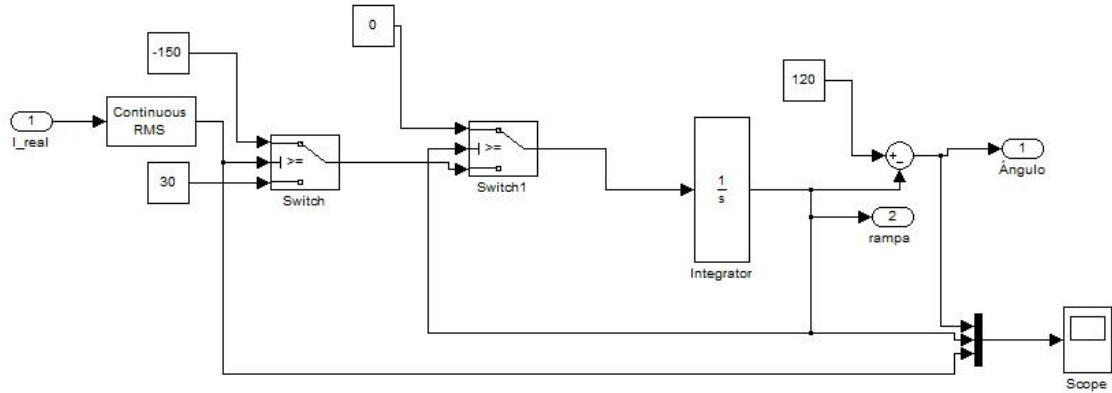


Figura 5.26. Bloque de control del graduador.

Este subsistema genera en su salida la rampa de ángulo de disparo que se requiere. Para ello se integra un valor constante y se resta la rampa resultante de la integración a un valor de 120, consiguiéndose de este modo una rampa decreciente en el tiempo que parte de 120.

Con el fin de que la rampa de salida del integrador alcance un valor de 60 en el tiempo de rampa requerido de 2 segundos, lo que implicará también que la rampa de salida del subsistema tenga un valor de 60, la constante integrada tendrá un valor de:

$$Rampa = \int K \cdot dt = K \cdot t$$

$$Rampa = 60 \text{ y } t = 2 \text{ s} \Rightarrow K = \frac{60}{2} = 30$$

Cuando la rampa alcanza el valor de 60 no interesa que siga descendiendo el ángulo de disparo, por ello un interruptor a la entrada del integrador comuta cuando la rampa de salida del mismo llega al valor de 60, comunicándose a la entrada del integrador valor 0. Esto implica a partir de ese momento la salida del integrador es constante y fijada al valor anterior a la conmutación.

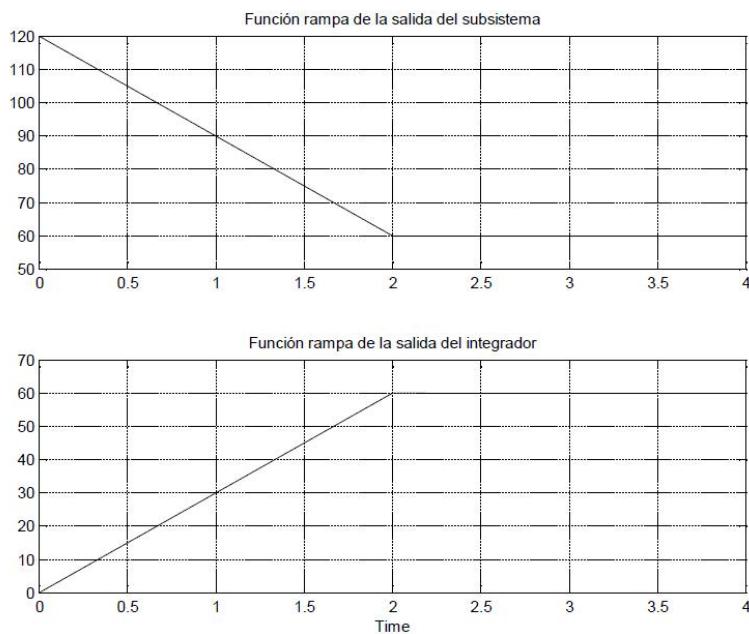


Figura 5.27. Rampas a la salida del bloque y a la salida del integrador.

La limitación de intensidad se realiza del siguiente modo: si la corriente eficaz de una de las fases del generador no ha sobrepasado el límite fijado, la rampa del ángulo de disparo tendrá la forma que ya se ha explicado. Por el contrario, cuando se sobrepasa el límite, se aplica al integrador una constante negativa de valor absoluto 5 veces mayor que la constante que se integra en condiciones normales. De esta manera el resultado de la integral tiene ahora pendiente negativa, reduciéndose el valor de ésta desde el correspondiente al instante antes de sobrepasarse el límite de corriente hasta que la corriente descienda por debajo de ese límite. Si la salida del integrador tiene pendiente negativa, la salida del bloque será de pendiente positiva, por lo que el ángulo de disparo en estas condiciones aumentará.

Establecemos el límite de corriente en 60 A, valor que resulta ser el de corriente nominal del graduador que se ha planteado para el aerogenerador. En esta simulación nunca se alcanza tal valor durante el arranque.

Para constatar la efectividad del limitador de corriente, se realiza una simulación de la máquina funcionando como motor y regulada por el modelo de graduador aquí planteado. Las condiciones de carga son las mismas que se han establecido en el apartado 5.4.2.

Establecemos un límite de intensidad en el arranque del motor de 120 A. En la figura 5.27 se muestra la forma que sigue la función del ángulo de disparo, incrementándose si la corriente está por debajo de 120 A y decreciendo si se sobrepasa este valor.

El control en esta situación requiere valores distintos de las constantes, ya que el arranque es más duradero. La constante de actúa en condiciones normales es de valor 12, para que se produzca el arranque en 10 segundos. La constante que actúa cuando se sobrepasa el límite es de valor absoluto 5 veces superior al anterior, 60.

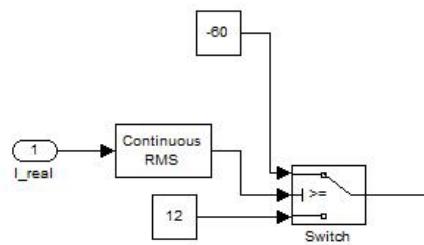


Figura 5.28. Valor de las constantes del limitador de intensidad para motor asíncrono.

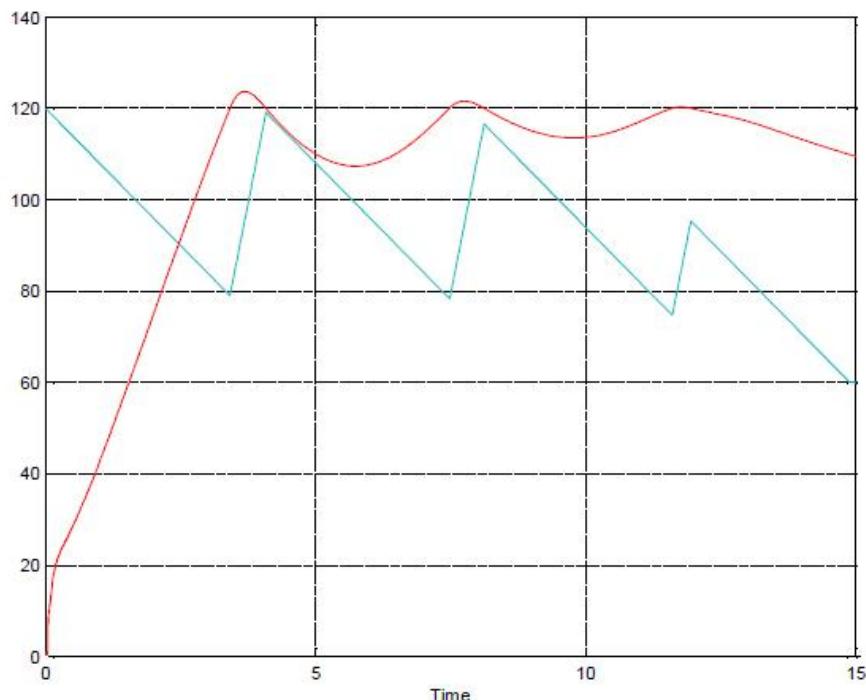


Figura 5.29. Ángulo de disparo y corriente eficaz de fase en motor asíncrono.

En la figura 5.29 se muestra la trayectoria que sigue el ángulo de disparo en función de si se alcanza el límite de corriente o no, de color azul, y la corriente eficaz por una de las fases del motor, en color rojo. Se utiliza una constante 5 veces mayor integrada cuando salta el limitador a la constante integrada en condiciones normales para que se aumente el ángulo de disparo de manera más rápida, y así producirse una limitación mejor.

#### Interruptor de bypass

El graduador trifásico que se ha modelado cuenta con un interruptor de puenteo que cortocircuita los tiristores cuando se ha producido la conexión y el generador experimenta toda la tensión del sistema trifásico de alimentación.

El modelado de éste se muestra en la figura 5.30.

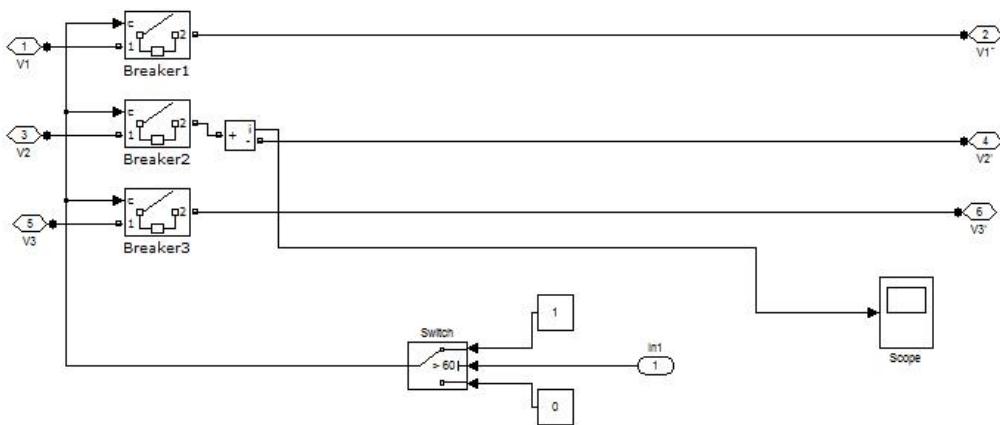


Figura 5.30. Modelo del interruptor de puenteo.

Se dispone un interruptor en paralelo con cada fase del bloque de tiristores. Cuando la rampa del ángulo de disparo ha alcanzado su valor final, correspondiente a un ángulo de disparo de  $60^\circ$ , se ejecuta la orden de cierre de los interruptores, los cuales ofrecen un camino de baja impedancia a las corrientes, ocasionando el cese de la conducción de los tiristores, que permanecerán en bloqueo durante el funcionamiento en régimen permanente del aerogenerador.

### 5.5.3 Simulación del aerogenerador con graduador trifásico.

El modelado del aerogenerador cuando se encuentra operando el generador de 30 kW es el mostrado en la figura 5.18. En el modelo de máquina asincrónica que proporciona SIMULINK deben introducirse los parámetros que se calcularon en el apartado 5.4.1 para este generador.

Además de los parámetros del circuito equivalente de la máquina, se introducirá la potencia nominal y la tensión de línea nominal de ésta, la frecuencia de la red a la que se encuentra conectada y los pares de polos del generador:

$$P_n = 30 \text{ kW} \quad U_n = 380 \text{ V} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad p = 2$$

Por otra parte, hay que tener en cuenta la inercia que presenta el rotor eólico que tiene que arrastrar el viento para conseguir el movimiento rotacional. La inercia de cada pala, según la tabla 1.1, es de  $1350 \text{ kg.m}^2$ , Por tanto consideramos la inercia del rotor el triple de este valor:

$$J_{turbina} = 1350 \times 3 = 4050 \text{ kg.m}^2$$

La inercia equivalente en el lado del eje del generador tiene la siguiente expresión:

$$J_{generador} = \frac{J_{turbina}}{N^2}$$

[Ec. 5.5]

Donde  $N$  es la relación de multiplicación. En las condiciones citadas, la inercia equivalente en el generador será:

$$J_{generador} = \frac{4050}{20,26^2} = 9,86 \text{ kg.m}^2$$

La fricción viscosa del aire se considera despreciable. Por último, debe establecerse en el generador la condición inicial de encontrarse éste girando a una velocidad de 1425 r.p.m. en el momento de la conexión a red del mismo. A esta velocidad, el deslizamiento resulta del siguiente modo:

$$s_{inicial} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05$$

En la figura 5.31 se puede observar la ventana del programa SIMULINK en la cual se introducen todos los datos que acaban de exponerse.

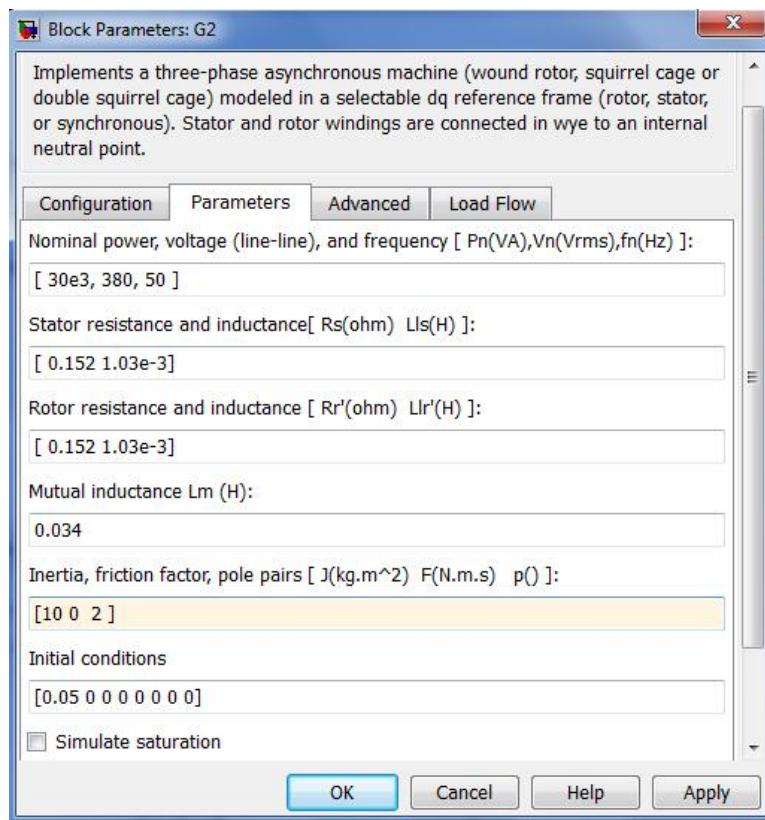
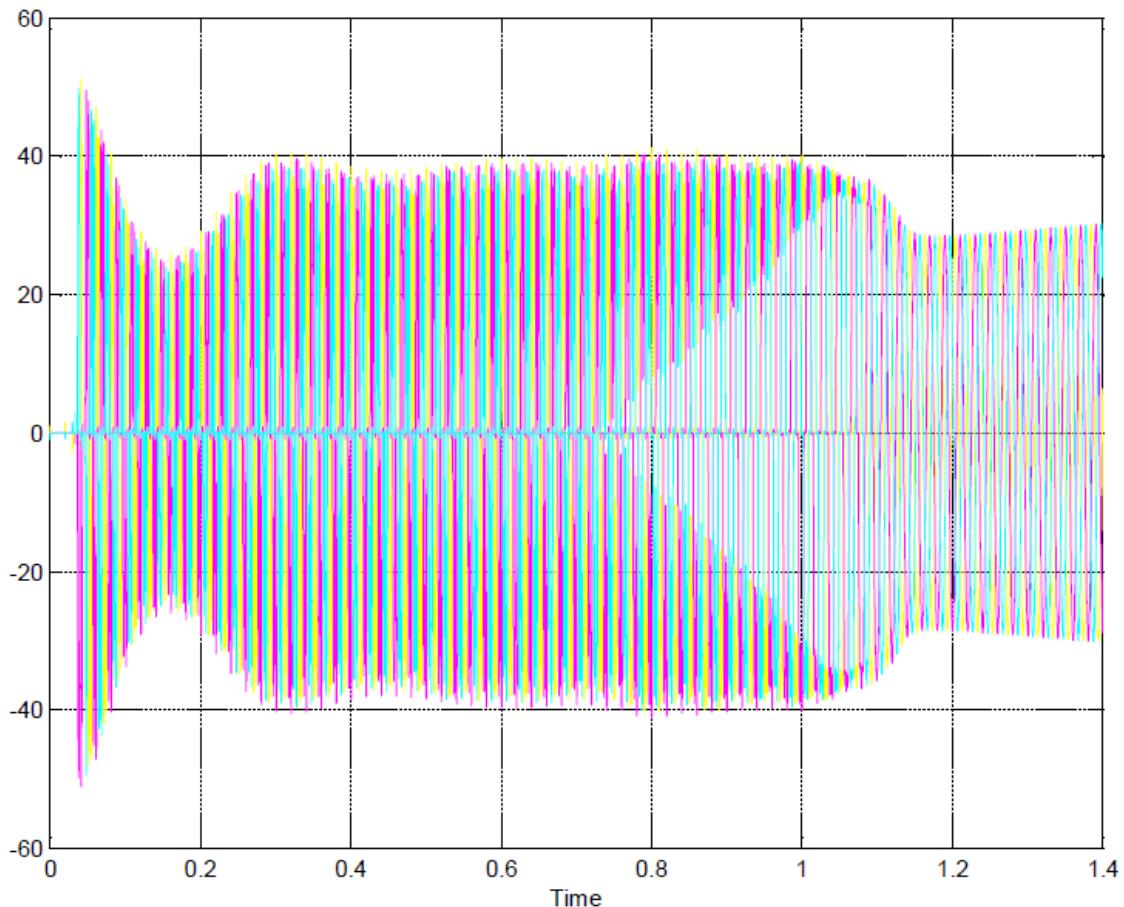


Figura 5.31. Ventana de parámetros del generador.

El generador de 30 kW se conecta a la red para una velocidad de viento de 6,5 m/s, velocidad a la que el generador de 7,5 kW alcanza su potencia nominal. La velocidad de viento a la que alcanza la potencia nominal el generador simulado es de 12 m/s. Por tanto, el rango de operación de este generador esta comprendido entre 6,5 m/s y 12 m/s. Se realizan tres simulaciones a las velocidades de viento de 6,5 m/s, 9 m/s y 12 m/s.

### **Simulación a velocidad de viento de 6,5 m/s**

Las formas de onda de las corrientes de las fases del generador a esta velocidad de viento se muestran en la figura 5.32.



*Figura 5.32. Ondas de corrientes de fase para  $v = 6,5$  m/s.*

Los valores de pico alcanzados por las corrientes de fase durante el arranque toman un valor menor a los correspondientes cuando el generador trabaja en condiciones nominales en régimen permanente. El valor máximo de corriente que se presenta durante el transitorio de arranque a esta velocidad de viento es de 51 A, mientras que el valor de pico de corriente cuando el generador desarrolla su potencia nominal es de 75 A. A medida que la velocidad de giro se acerca a la de sincronismo, las corrientes de fase reducen su amplitud, ya que el deslizamiento a esta velocidad es nulo.

En la figura anterior no se pueden visualizar correctamente las formas de onda que toman las corrientes, dado que el tiempo que se ha establecido para la simulación es elevado para así poder apreciar el momento en el que el arranque concluye.

La figura 5.33 muestra una ampliación de las ondas de corriente junto con las ondas de tensión en el momento que la corriente se hace continua.

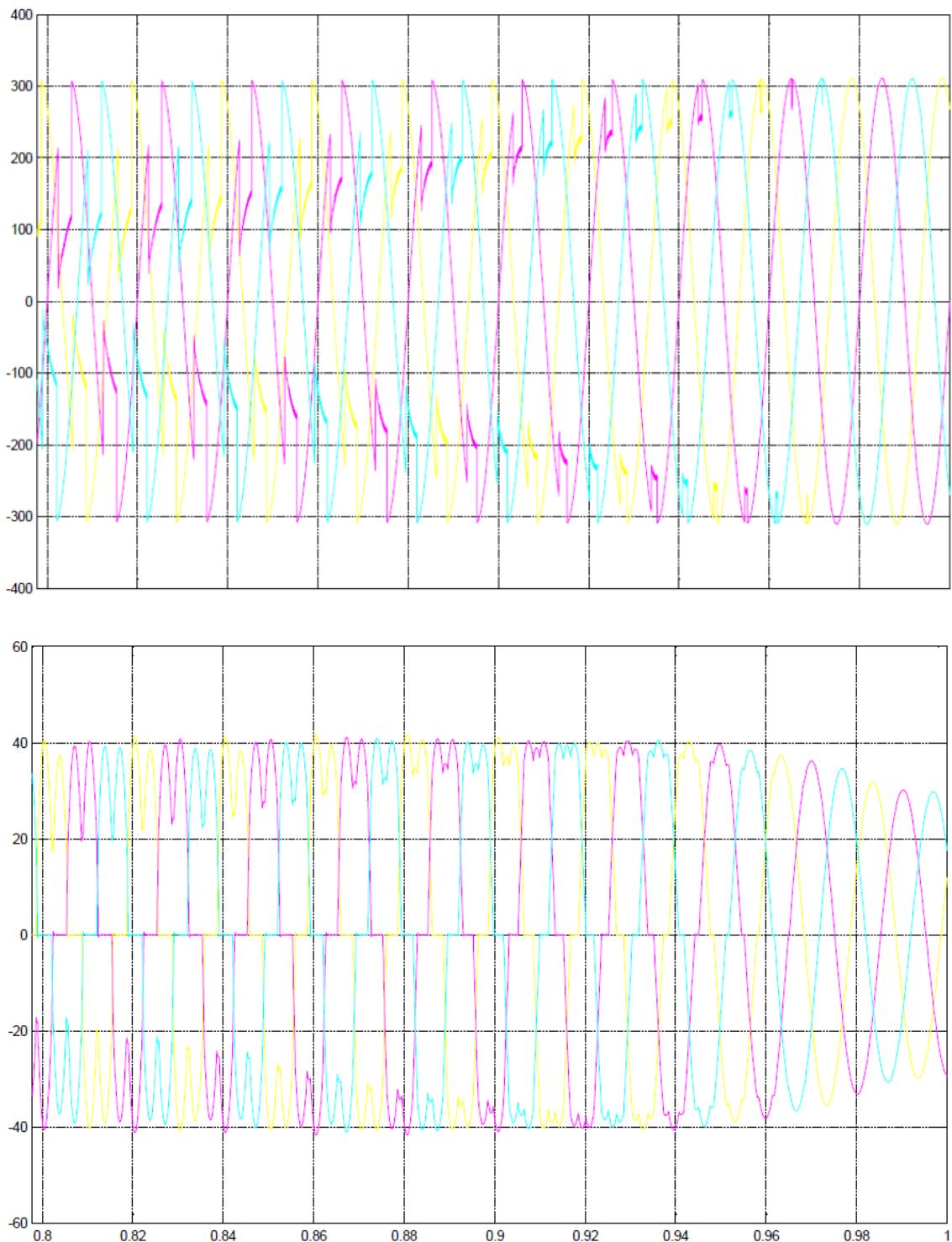
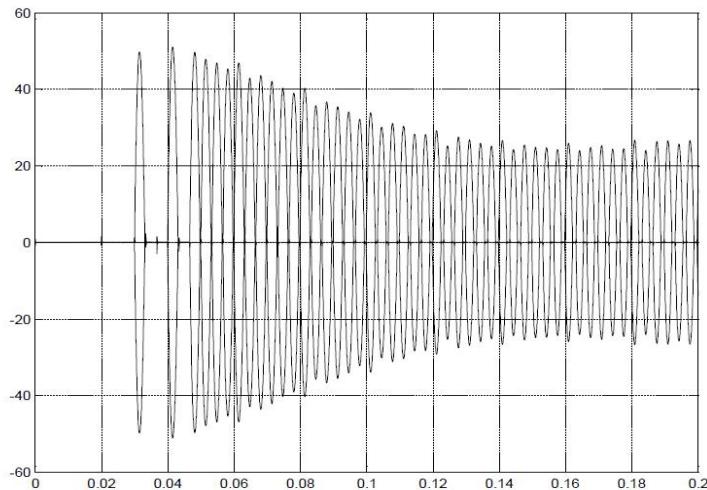


Figura 5.33. Ampliación de las ondas de tensión y corriente para  $v = 6,5 \text{ m/s}$ .

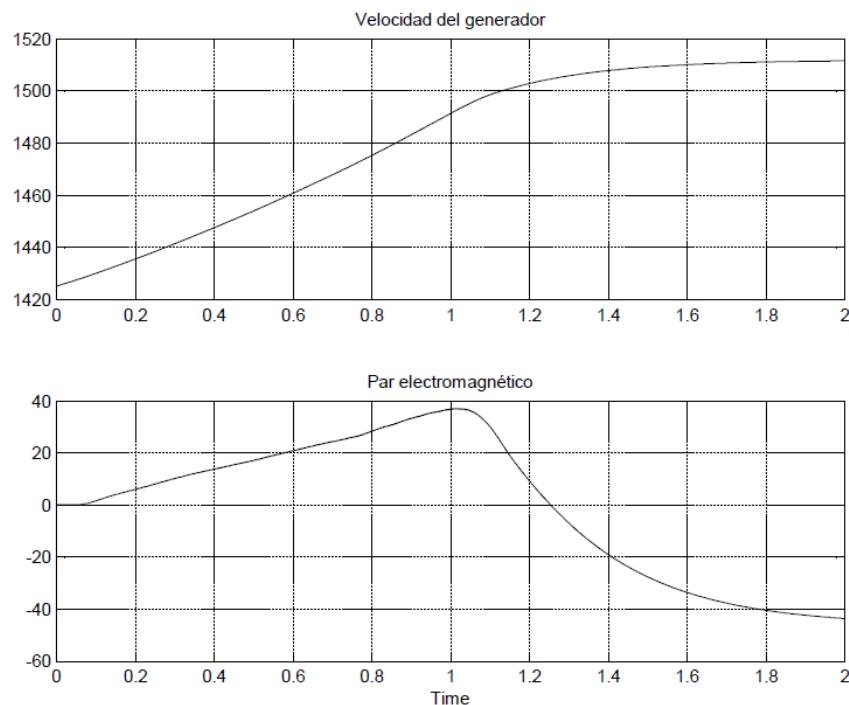
Se puede apreciar en esta figura que el ángulo de disparo se reduce paulatinamente, mientras que los bucles de corriente son cada vez de mayor duración por efecto del par producido en la turbina a consecuencia del viento incidente, hasta el momento que la corriente se hace continua y se pierde la regulación de la tensión y la corriente en el generador. A partir de este momento las corrientes dependen de la acción del viento.

La siguiente gráfica muestra el aspecto de las corrientes en los primeros instantes de la conexión:



*Figura 5.34. Corrientes de fase tras la conexión del generador.*

La evolución de la velocidad de giro del rotor del generador y del par electromagnético resulta de la forma que se expone en la figura 5.35. La velocidad se estabiliza para un valor de 1512 r.p.m., mientras que el par lo hace para un valor de 46 N.m.



*Figura 5.35. Velocidad de rotor de la máquina y par electromagnético.*

Por otro lado, las potencias activa y reactiva que genera y absorbe, respectivamente, el generador, toman la forma con respecto al tiempo que se muestra en la siguiente gráfica.

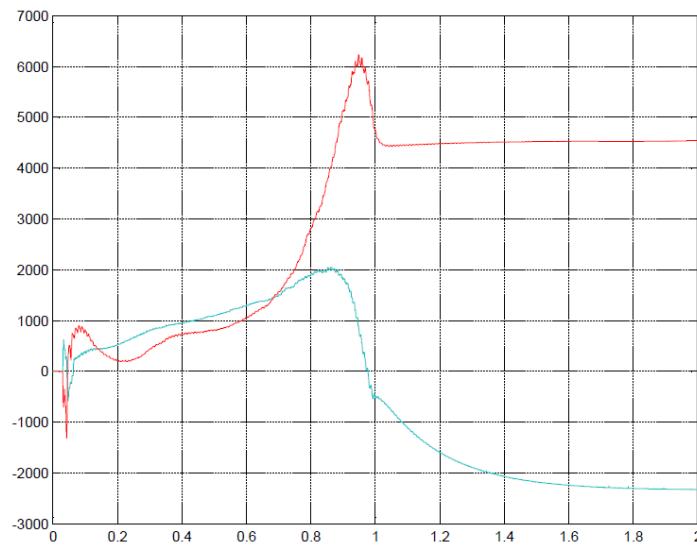


Figura 5.35. Potencia activa y reactiva para  $v = 6,5 \text{ m/s}$

La potencia activa se muestra en color azul y la reactiva en color rojo. La evolución de la potencia activa resulta de la siguiente manera: Durante el primer segundo ésta resulta positiva, ya que proviene de la red de alimentación puesto que no comienza la generación hasta que no se ha traspasado la velocidad de sincronismo. Cuando se ha alcanzado la velocidad de sincronismo, la potencia activa toma valor negativo, lo cual implica que se cede potencia del aerogenerador a la red. La potencia activa se estabiliza en un valor de 2,33 kW por fase, lo que implica una potencia total de 7 kW.

La potencia reactiva resulta durante todo el régimen de operación positiva, ya que siempre es absorbida de la red de alimentación trifásica. Antes de estabilizarse, ésta experimenta una elevación brusca, que corresponde al pico de energía reactiva necesaria para la generación del campo magnético giratorio en el entrehierro de la máquina. El valor que presenta en régimen permanente la potencia reactiva es de 4,53 kVAr, por lo que la potencia reactiva consumida total es de 13,6 kVAr.

La utilización de un graduador trifásico implica la inyección de corrientes armónicas en la máquina asincrónica. Para una estimación de las amplitudes de éstas, calculamos el factor de distorsión THD (Total Harmonic Distortion) para distintos instantes del arranque. Para el instante  $t = 0,1 \text{ s}$  y con una velocidad de viento de  $v = 6,5 \text{ m/s}$ , obtenemos un valor del THD de 0,6856.

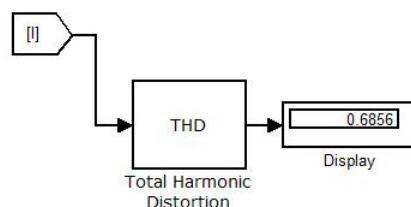


Figura 5.36. Factor de distorsión armónica para  $v = 6,5 \text{ m/s}$  y  $t = 0,1 \text{ s}$ .

Sin embargo, para  $t = 0,94$ , momento en el arranque está a punto de finalizar, el THD toma un valor de 0,1369, muy inferior al anterior ya que las corrientes de fase son prácticamente sinusoidales debido a que éstas tienden a la continuidad.

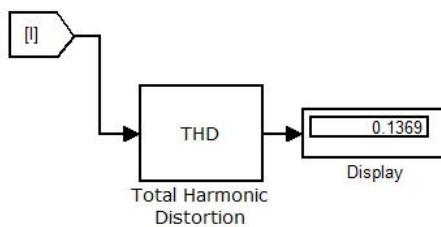


Figura 5.37. Factor de distorsión armónica para  $v = 6,5 \text{ m/s}$  y  $t = 0,94 \text{ s}$ .

### Simulación a velocidad de viento de 9 m/s

Las formas de onda de las corrientes de las fases del generador a esta velocidad de viento se muestran en la figura 5.38.

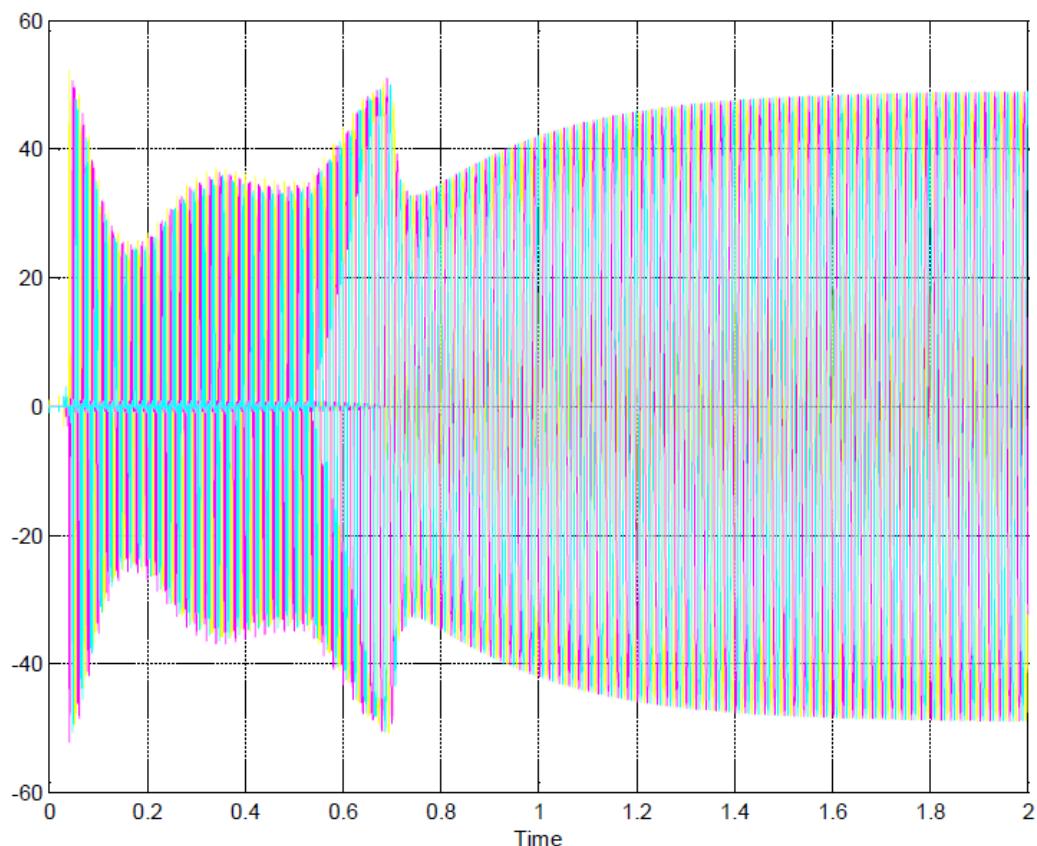


Figura 5.38. Corrientes de fase para  $v = 9 \text{ m/s}$ .

Como es obvio, el régimen permanente para una velocidad de viento de 9 m/s se alcanza antes que para una velocidad de 6 m/s.

Asimismo se observa que en el transitorio los máximos valores que alcanzan las corrientes de fase son de mayor magnitud que en el arranque cuando la velocidad de viento es de 6 m/s, aunque en muy pocos amperios, por ello se puede considerar que ambos transitorios de conexión son similares. El valor de pico máximo de corriente durante el arranque suave es de 52 A, valor inferior al de la amplitud de las corrientes de fase en el régimen permanente para esta velocidad de viento.

La velocidad de giro de la máquina y el par electromagnético para  $v = 9$  m/s toman los valores con respecto al tiempo que se muestran en la figura 5.39.

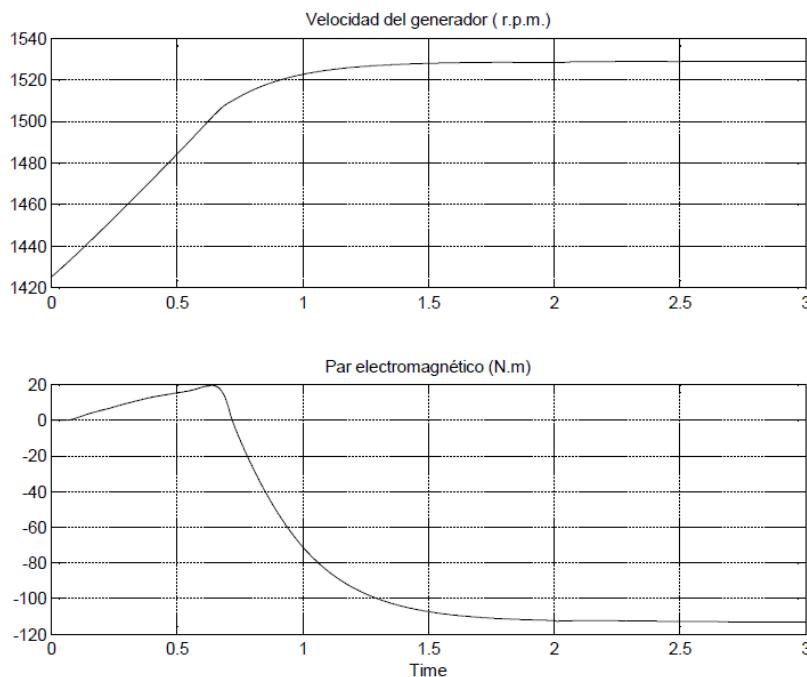


Figura 5.39. Velocidad de giro del generador y par electromagnético para  $v = 9$  m/s.

La velocidad de sincronismo se alcanza transcurridos 0,6 segundos del inicio de la rampa de tensión proporcionada por el graduador, mientras que para  $v = 6,5$  m/s ésta era alcanzada tras 1,1 segundos del instante de conexión. El par electromagnético se anula antes que para  $v = 6$  m/s, ya que el par mecánico que ejerce un viento de velocidad mayor a éste implica una mayor aceleración del rotor de la máquina, lo que conlleva que la generación de potencia se produzca con anterioridad, y en consecuencia cambie el signo del par electromagnético.

La trayectoria que experimentan las potencias activa y reactiva con respecto al tiempo a esta velocidad de viento puede observarse en la siguiente figura. En ella se aprecia un valor de potencia reactiva en régimen permanente similar a la consumida para una velocidad de viento de 6 m/s, y teniendo en cuenta que la potencia activa es superior en este caso, el factor de potencia aumenta con respecto a la anterior situación. La potencia activa por fase en régimen permanente es de  $P_f = 5,7$  kW, por lo que la potencia activa total generada es de  $P_t = 17,1$  kW. La potencia reactiva por fase en este caso es de  $Q_f = 5$  kVAr, por tanto la total será de  $Q_t = 5$  kVAr.

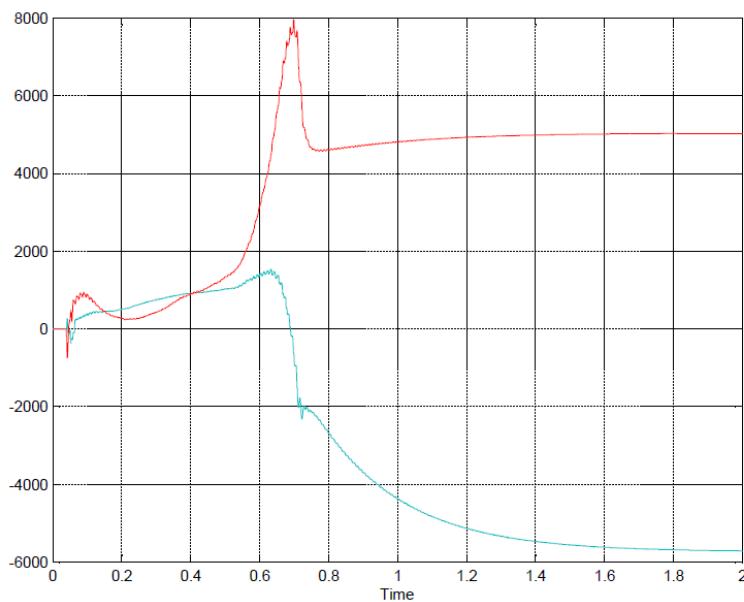


Figura 5.40. Potencias activa y reactiva para  $v = 9 \text{ m/s}$ .

Por último se analizan los valores del THD de corriente en distintos instantes del transitorio de conexión. En el instante  $t = 0,1 \text{ s}$ , el factor de distorsión toma un valor de 0,637, y para  $t = 0,6 \text{ s}$  éste corresponde a un valor de 0,369.

#### Simulación a velocidad de viento de 12 m/s

A la velocidad de 12 m/s el generador desarrolla su potencia nominal. Las ondas de corriente de fase para esta velocidad son expuestas en la siguiente figura.

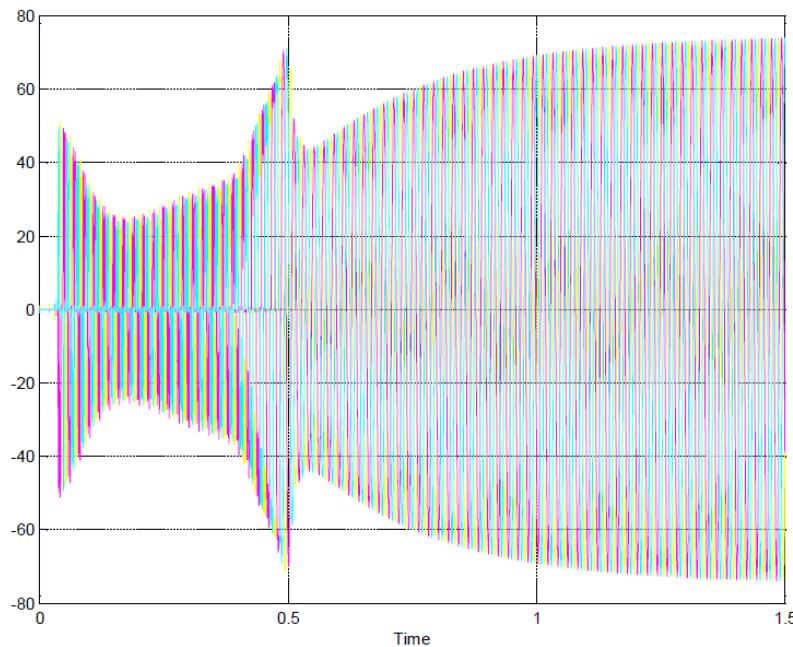


Figura 5.41. Corrientes de fase para  $v = 12 \text{ m/s}$ .

El paso a funcionamiento de la máquina como generador se realiza en esta situación con anterioridad a los otros casos analizados; la velocidad de sincronismo se alcanza con más rapidez ya que el par absorbido por la turbina es mayor. La corriente en el transitorio de arranque alcanza valores del orden de la corriente en régimen permanente para esta velocidad, por lo que se puede considerar que la conexión del aerogenerador a la red no supone una absorción de intensidad desmedida.

La velocidad de giro en r.p.m. y el par electromagnético de la máquina evolucionan con respecto al tiempo tal y como se muestra en la figura 5.42. Se observa que en efecto el rotor del generador llega a la velocidad de sincronismo con anterioridad a los otros casos estudiados.

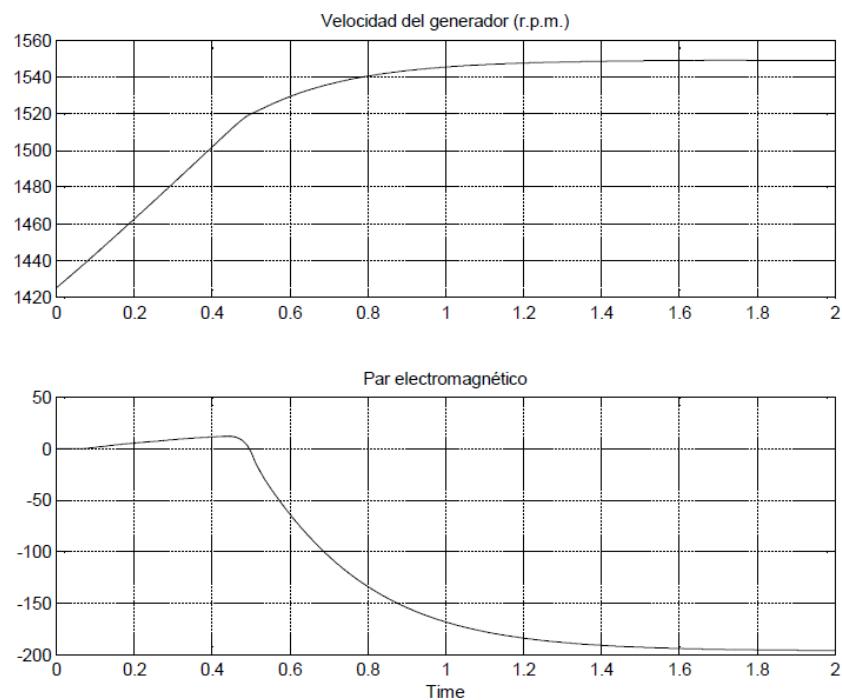


Figura 5.42. Velocidad del generador y par electromagnético para  $v = 12 \text{ m/s}$ .

En lo que se refiere a la potencia reactiva, en la figura 5.43 se aprecia un elevado pico de consumo de reactiva cuando la máquina pasa a funcionar como generador y la corriente se hace continua. Ya que este suceso ocurre antes que para las otras velocidades de viento, los ángulos de disparo en ese momento no están muy alejados de  $120^\circ$ , por lo que hasta ese instante la corriente necesaria para la magnetización de los bobinados ha sido reducida. Por ello, al hacerse la corriente continua y en consecuencia la tensión eficaz en el estator sea igual a la de alimentación, los bobinados absorben corriente de manera brusca para generar el campo magnético. La potencia reactiva por fase se estabiliza en el régimen permanente en un valor de  $6 \text{ kVAr}$ , así que la potencia reactiva total será igual a  $Q_t = 18 \text{ kVAr}$ .

La potencia activa generada en el régimen permanente toma un valor por fase de  $9,8 \text{ kW}$ , por tanto la potencia generada por las tres fases asciende a  $29,4 \text{ kW}$ .

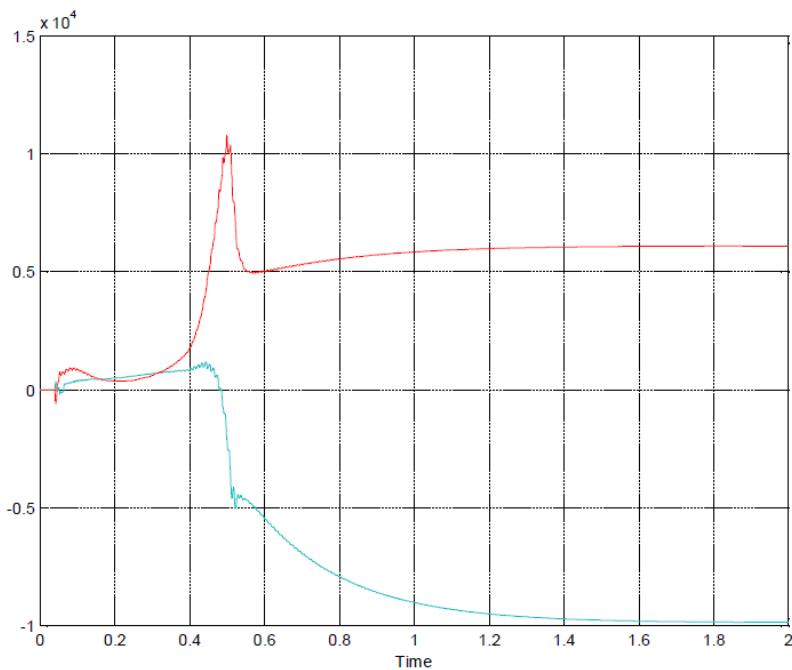


Figura 5.43. Potencias activa y reactiva para  $v = 12 \text{ m/s}$ .

Por último se calcula el THD de las corrientes para dos instantes distintos. En  $t = 0,1 \text{ s}$  el coeficiente de distorsión es igual a 0,6427 y para  $t = 0,4 \text{ s}$  el THD corresponde a un valor de 0.3.

#### 5.5.4 Compensación de energía reactiva.

La compensación de energía reactiva del generador simulado se lleva a cabo mediante una batería de condensadores que proporcione 10 kW acoplado a un sistema de tensiones trifásico de 380 V de tensión de línea. El modelo del subsistema de compensación de reactiva se muestra en la figura 5.44.

Se unen los terminales del bloque de carga capacitiva trifásica que proporciona SIMULINK entre sí, de tal manera que ésta quede conectada en triángulo. El banco de condensadores será conectado a la carga, en este caso al generador, cuando haya finalizado la rampa de ángulo de disparo, mediante tres interruptores ideales disponibles en la herramienta de simulación.

Teniendo en cuenta la expresión de la potencia reactiva se calcula el valor de la capacidad por fase necesaria para proporcionar la potencia reactiva requerida.

$$Q_c = 3 \cdot U_n^2 \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad C = \frac{10000}{380^2 \cdot 3 \cdot 100\pi} = 73,5 \mu\text{F}$$

Esta capacidad es introducida en el cuadro de diálogo correspondiente a la carga trifásica capacitiva. Asimismo se introducen resistencias en serie con cada fase de valor  $3,5 \Omega$  para que los picos de corriente cuando se conecte la batería no sean muy elevados.

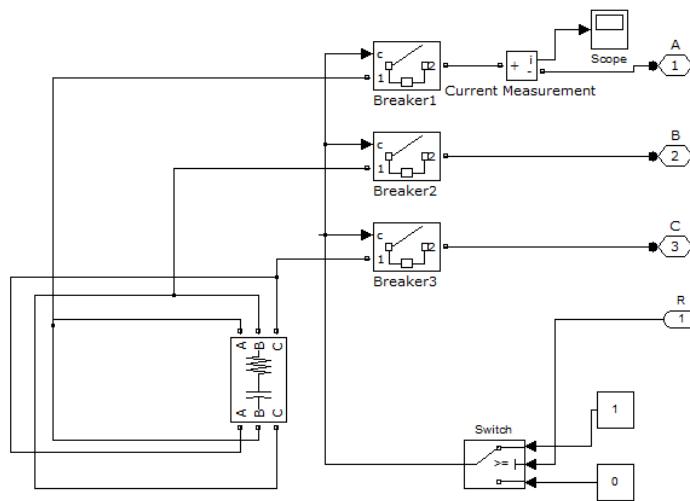


Figura 5.44. Diagrama de bloques del compensador de reactiva.

A partir de los datos de potencia reactiva consumida y potencia activa generada para la velocidad nominal obtenidos de la gráfica 5.43, se calcula el factor de potencia del generador en condiciones nominales:

$$\frac{Q}{P} = \tan \varphi \Rightarrow \varphi = 31,5^\circ \Rightarrow \cos \varphi = 0,853$$

El efecto sobre la potencia reactiva consumida de la red de alimentación del modelo que ejerce el banco de condensadores puede visualizarse en la figura 5.45, que muestra las potencias para la velocidad nominal antes y después de la conexión de la batería.

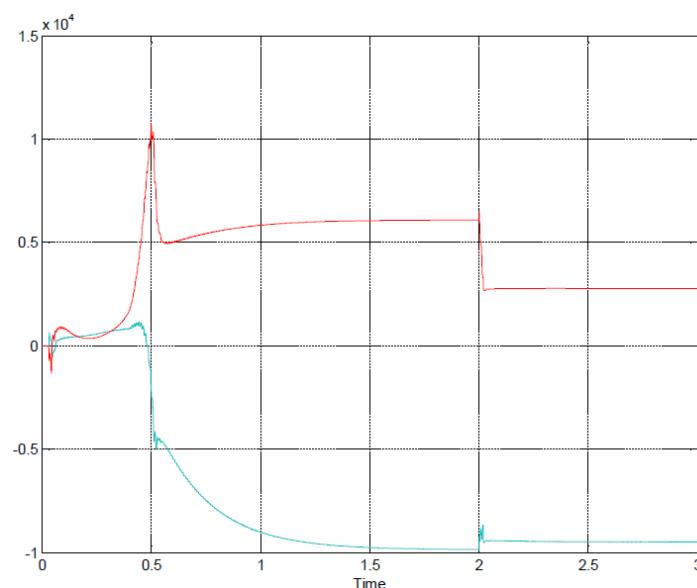


Figura 5.45. Potencias activa y reactiva con banco de condensadores para  $v = 12 \text{ m/s}$ .

De la gráfica anterior obtenemos que tras la aplicación del banco de condensadores la potencia reactiva que se consume tiene un valor de  $Q = 2780$  kVAr por fase, y que se proporciona a la red una potencia activa por fase de  $P = 9500$  kW. El banco de condensadores implica pérdidas de potencia debido a su componente resistiva. En esta tesisura el factor de potencia en el lado de red tiene un valor de:

$$\frac{Q}{P} = \tan \varphi \Rightarrow \cos \varphi = 0,9598$$

Las corrientes de fase que fluyen por los conductores comprendidos entre la batería de condensadores y el sistema de tensiones trifásico en condiciones nominales sufren el cambio tras la aplicación del compensador de reactiva que se muestra en la siguiente figura:

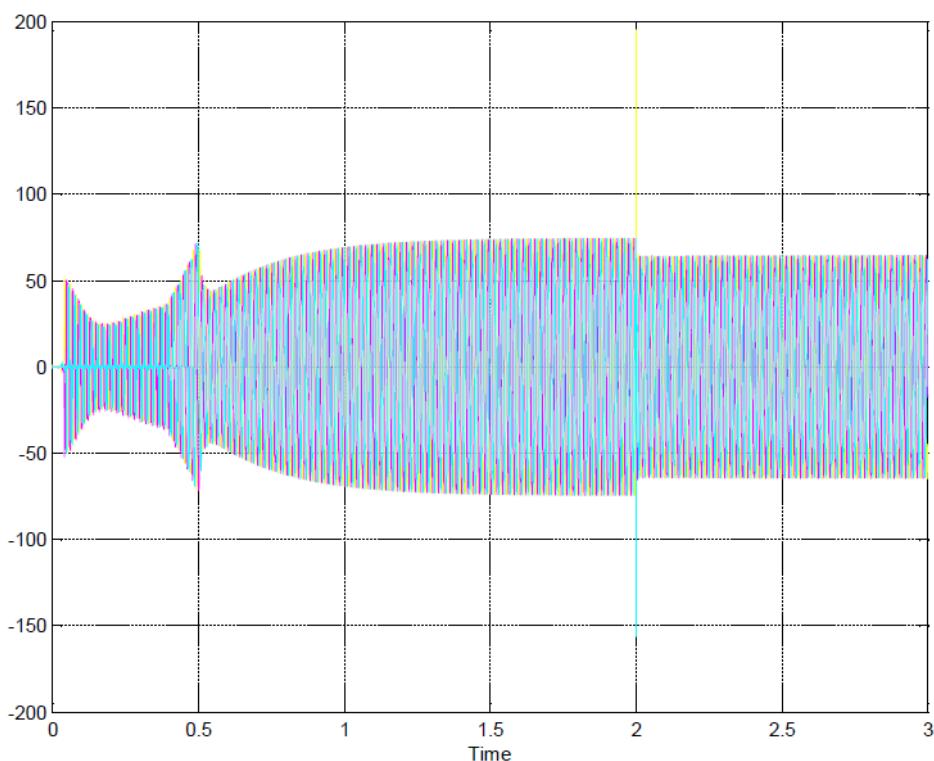


Figura 5.46. Corrientes de fase de la línea antes y después de la compensación de reactiva para  $v = 12$  m/s.

El resultado obtenido es el siguiente: las corrientes de fase circulando entre la fuente de tensión de alimentación del generador y el banco de condensadores una vez aplicado éste, en condiciones nominales, se reducen desde un valor eficaz de corriente de fase de  $I_{ef} = 52,33$  A hasta un valor de  $I_{ef} = 45,6$  A. Se produce un pico de intensidad al conectar el banco dado que la impedancia que presentan los condensadores en el momento de conexión es muy reducida.

Asimismo se simula la compensación de energía reactiva para una velocidad de viento de 7 m/s. La potencia reactiva y activa por fase en este caso son de  $Q = 1274$  kVAr y  $P = 2700$  kW, por tanto el factor de potencia en estas condiciones resulta del siguiente modo:

$$\cos \varphi = 0,905$$

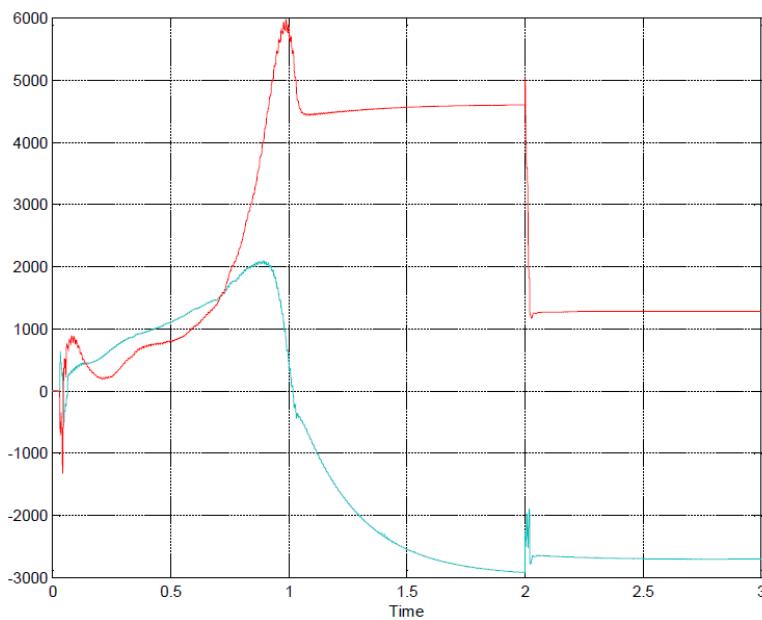


Figura 5.47. Potencias activa y reactiva con compensación de reactiva para  $v = 7 \text{ m/s}$ .

Debe tenerse en cuenta que los parámetros del circuito equivalente no son los reales del generador sino que son el resultado de una aproximación. El factor de potencia real en condiciones nominales difiere ligeramente del obtenido en la simulación, siendo el primero igual a 0,87 y el segundo de valor 0,853, lo que implica que la compensación de energía reactiva resultará más efectiva en la realidad.

### 5.5.5 Simulación del aerogenerador con graduador bifásico

El modelado del aerogenerador arrancado mediante graduador bifásico es en todo idéntico al homólogo conectado mediante graduador trifásico, excepto en el circuito de tiristores del graduador, cuyo modelo es el mismo que el utilizado en carga óhmico-inductiva, mostrado en la figura 5.10, y en el bloque de control del graduador.

El límite del ángulo de disparo que permite la conducción por los tiristores no es de  $120^\circ$  sino que resulta ser  $180^\circ$ , de la misma forma que ocurre para el control de la tensión de la carga inductiva mediante graduador bifásico y por los motivos explicados en el apartado 5.3.

Si aplicamos la misma rampa de ángulo de disparo que la utilizada para el graduador trifásico, la cual comienza en  $120^\circ$  y finaliza en un ángulo de  $60^\circ$  transcurridos 2 segundos, las corrientes de fase resultantes en el generador, para condiciones nominales de viento, toman la forma mostrada en la figura 5.48.

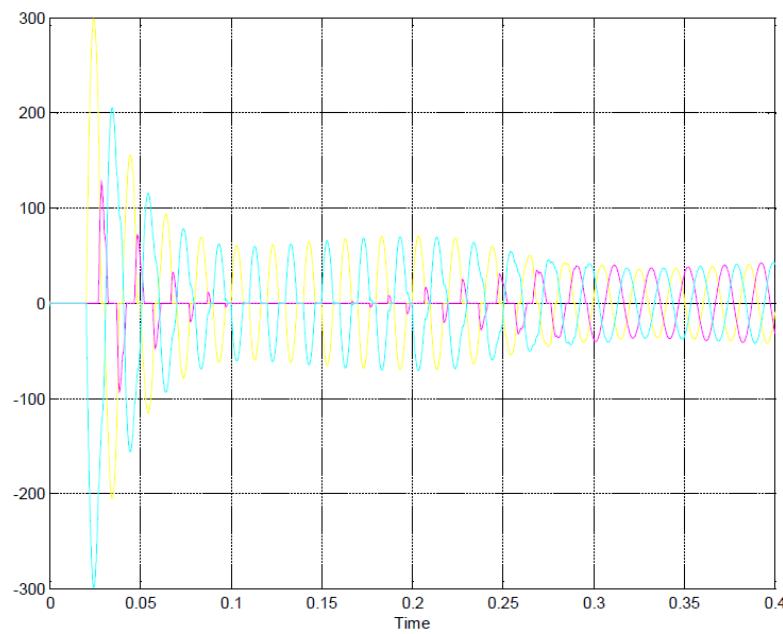


Figura 5.48. Corrientes de fase con rampa de ángulo iniciada en  $120^\circ$ .

Si aplicamos esta rampa, las corrientes iniciales son muy elevadas con respecto a las resultantes en el arranque con graduador trifásico, ya que un ángulo de disparo de  $120^\circ$  conlleva una tensión en el estator de la máquina suficiente como para que los bobinados estatóricos absorban corriente de manera brusca. Por ello se descarta esta rampa de control.

Estableciendo una rampa decreciente en el tiempo iniciada en  $180^\circ$  y cuyo valor final sea de  $100^\circ$ , se obtienen mejores resultados en las corrientes de fase.

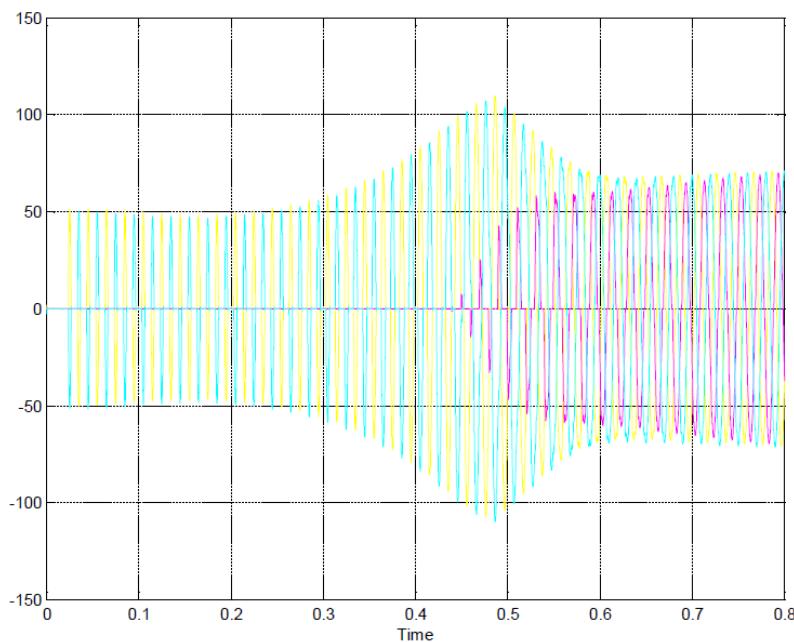


Figura 5.49. Corrientes de fase con rampa de ángulo iniciada en  $180^\circ$ .

Se observa que durante el transitorio de conexión las corrientes de fase están en desequilibrio, lo que implica un calentamiento mayor de los bobinados que si éstas no lo fueran, además los valores máximos alcanzados por la fase no controlada y una de las fases controladas, ubicados en torno a 100 A, corresponden a valores superiores a los correspondientes al arranque con graduador trifásico para condiciones nominales, para el cual las intensidades máximas resultan del orden de 70 A.

El coeficiente de distorsión THD para la potencia nominal a  $t = 0,1$  s de la corriente de la fase controlada que conduce durante el arranque toma un valor de 0,9664, valor que corresponde también al THD de la corriente de la fase no controlada, ya que la corriente de la fase controlada retorna por la fase no controlada y la otra fase controlada no conduce.

El THD de la corriente correspondiente a  $t = 0,5$  s es igual a 0,1421, muy inferior al anterior valor ya que la corriente se hace continua muy pocos instantes después.

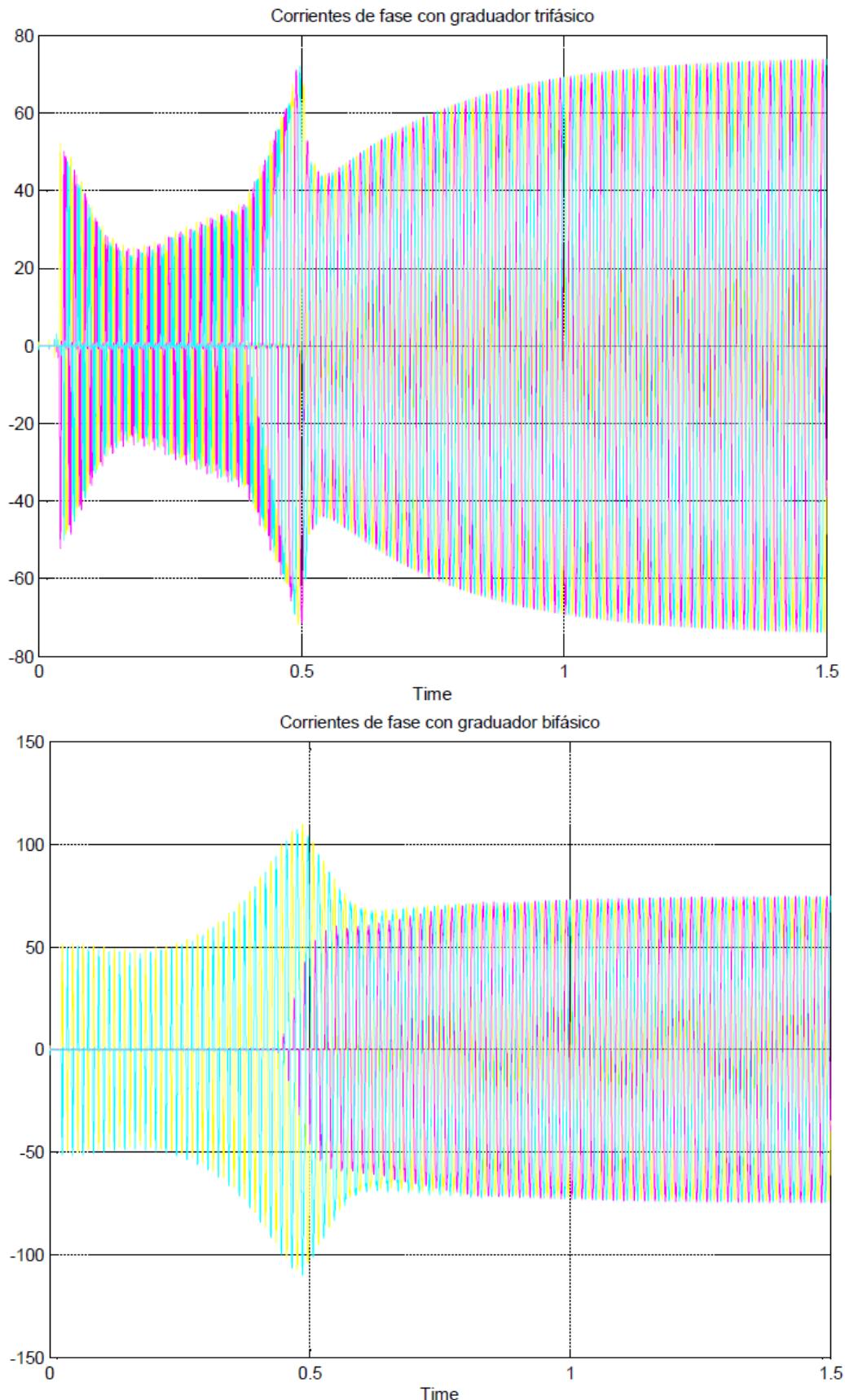
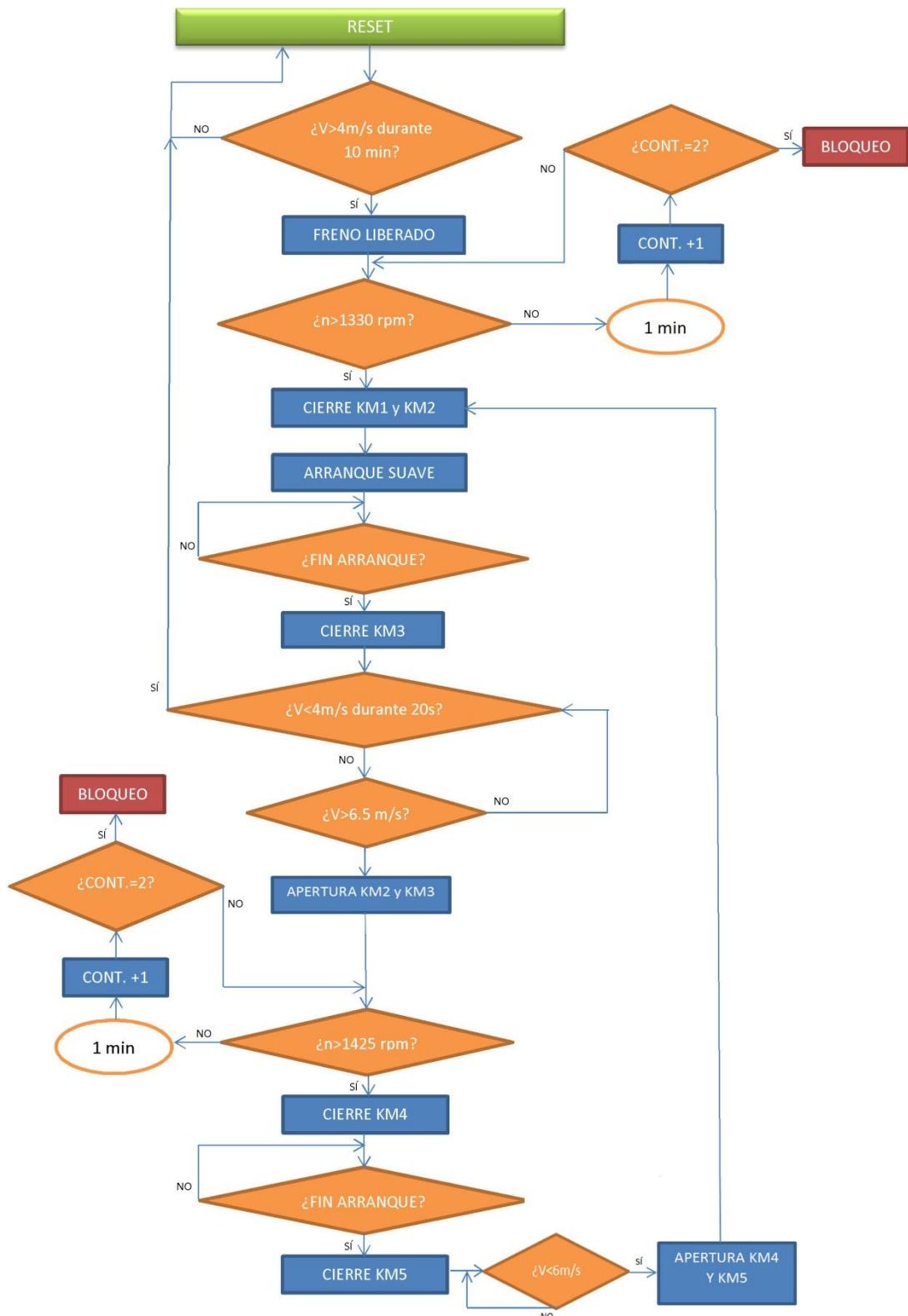


Figura 5.50. Comparación entre las corrientes de fase, para  $v = 12 \text{ m/s}$ , con arranque mediante graduador trifásico y graduador bifásico.

## 6 Presupuesto de los componentes de potencia

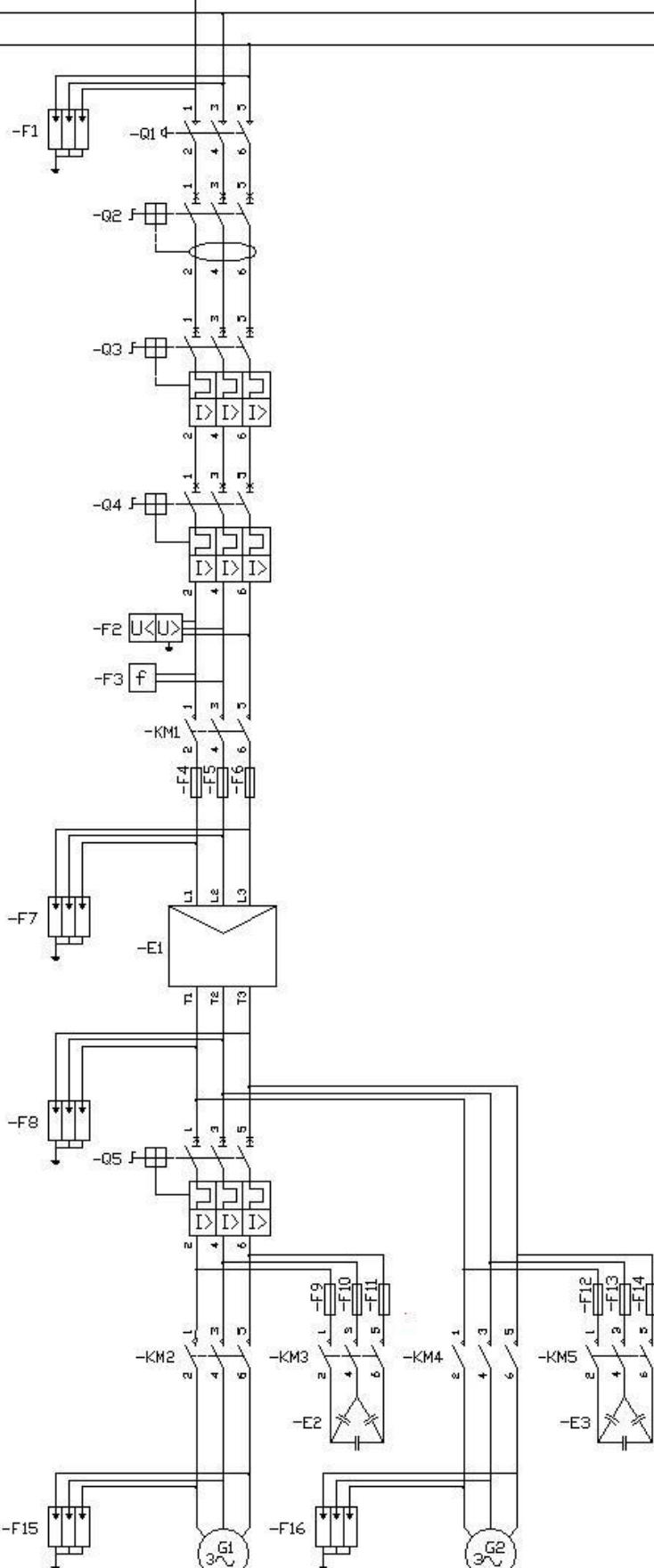
Descripción	ID. Particular	Valor	Fabricante	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Fusibles para semiconductores	F4,F5,F6	63 A (In)	SIBA	12	8,03	96,36
Fusibles APR	F9,F10,F11	6 A (In)	SIBA	6	1,761	10,566
Fusibles APR	F12,F13,F14	25 A (In)	SIBA	6	7,338	44,028
Interruptor-seccionador	Q1	80 A (In)	Siemens	1	126,79	126,79
Interruptor diferencial	Q2	63 A (In)	EPP	1	35,15	35,15
Interruptor automático	Q3	75 A (In)	Siemens	1	123	123
Interruptor automático	Q4	75 A (In)	Siemens	1	123	123
Interruptor automático	Q5	20 A (In)	Siemens	1	64	64
Interruptor automático	Q6	10 A (In)	Siemens	1	14,09	14,09
Descargadores	F7,F8,F17	40 KA (Imax)	Delixi	3	116,54	349,62
Descargadores	F1,F15,F16	100 KA (Imax)	Delixi	3	161,76	485,28
Relé de tensión	F2	380 V (Un)	Lovato Electric	1	160,24	160,24
Relé de frecuencia	F3	380 V (Un)	Lovato Electric	1	239,45	239,45
Contactor	KM1,KM4	80 A (In)	Siemens	2	177,84	355,68
Contactor	KM2	25 A (In)	Siemens	1	53,67	53,67
Contactor	KM3,KM5	19 A (In)	Siemens	2	38,52	77,04
Arrancador suave	E1	60 A (In)	Allen Bradley	1	781	781
Banco de condensadores	E2	2,5 kVAr	Siemens	1	174,77	174,77
Banco de condensadores	E3	10 kVAr	Siemens	1	230,34	230,34
Presupuesto final						3544,074

## 7 Diagrama de flujo del programa principal



## **8 Planos**

A



B

C

D

E

F

G

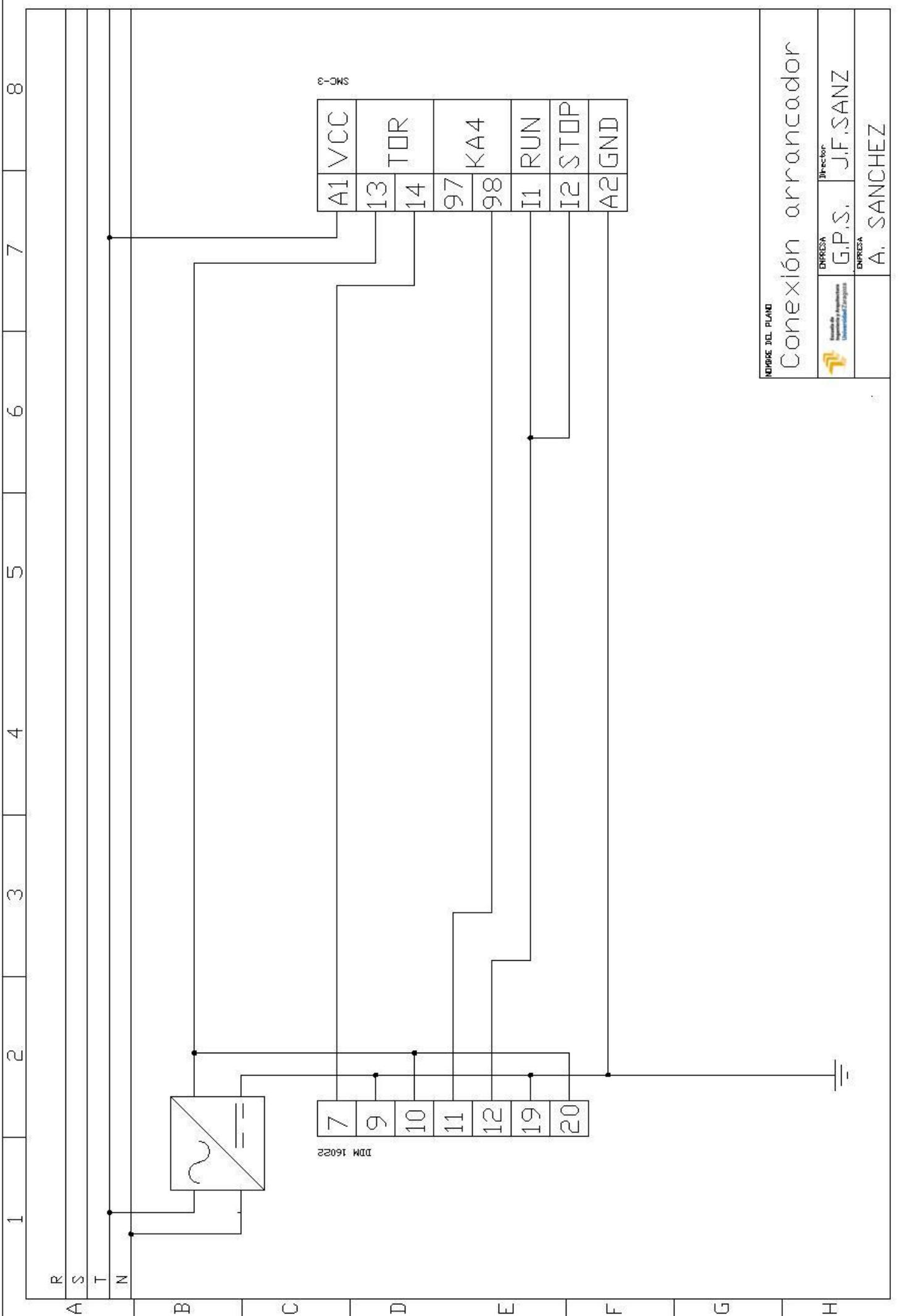
H

NOMBRE DEL PLANO

Circuito de potencia



EMPRESA	G.P.S.	DIRECTOR
EMPRESA	A. SANCHEZ	J.F. SANZ



## 9 Bibliografía

- Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. J.L. Rodríguez Amenendo, J.C. Burgos Díaz, S. Arnalte Gómez. Edición 2003.
- Arranque industrial de motores asíncronos. José María Merino Azcárraga. Serie McGraw-Hill de Electrotecnologías. Edición 1995.
- Manual de Baja Tensión. Criterios de selección de aparatos de maniobra e indicaciones para el protección de instalaciones y distribución. Siemens.
- Máquinas eléctricas. J.F. Sanz, V. Alcalá, E. Sainz, M.J. Velilla, J.L. Villa. Edición 2008.
- Wind energy systems for Electric Power Generation. Manfred Stiebler.
- Wind Turbine Grid Connection and Interaction. Deutsches windenergie institute. Tech wise A/S. DM energy.
- Apuntes de Regulación de Máquinas eléctricas. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad de Zaragoza.
- Apuntes de Electrónica de Potencia. Departamento de Ingeniería electrónica y telecomunicaciones. Universidad de Zaragoza.