

# TRABAJO FIN DE GRADO

---

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



## ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HUECOS DE TENSIÓN DE TURBINAS EÓLICAS CON GENERADORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

AUTOR: RAÚL ÁLVAREZ CASTUERA

DIRECTOR: SANTIAGO ARNALTES GÓMEZ

Leganés, junio de 2013.

## Agradecimientos

*A mis padres Felisa Castuera Enrique y Juan José Álvarez Aroca por haberme dado la oportunidad de conseguir las metas que he alcanzado y haberlo dado todo por mí y por mis hermanos.*

*A mi hermano Ángel Álvarez Castuera, que hizo que me decidiera por estudiar esta magnífica carrera, en la cual me ha ayudado de forma incondicional con sus consejos y su sabiduría.*

*A mi hermana Sara Álvarez Castuera y mi yaya Josefa Enrique Cerrón que siempre están haciéndome la vida más amena con su sentido del humor y lo dan todo por mí.*

*A mis tíos Claudio Pinto y Dolores Castuera y mi primo considerado un hermano Óscar Pinto ya que con ellos he pasado grandes momentos que me ayudaron a desconectar en momentos de dificultades.*

*A mis compañeros de clase, que sin ellos no hubiera sido lo mismo con esas partiditas de mus en la cafetería y por supuesto con la ayuda que me han ofrecido durante todo el periodo universitario.*

*A mi tutor del trabajo de fin de grado Santiago Arnaltes Gómez, que siempre me ha ayudado en todo y ha estado muy pendiente de mí durante la realización de todo el proyecto depositando su total confianza.*

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.1. Las energías.....	10
1.2. Evolución de los métodos de extracción de energía.....	10
1.3. Las simulaciones. ....	11
1.4. Objetivos.....	12
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>14</b>
2.1. La máquina de inducción.....	14
2.1.1. Aspectos constructivos y de funcionamiento.....	14
2.1.2. Circuito equivalente.....	16
2.1.3. Pérdidas.....	20
2.1.4. Par de rotación.....	21
2.1.5. Parámetros de la teoría de máquinas de inducción.....	23
2.2. Compensadores estáticos.....	24
2.2.1. Compensadores estáticos SVC.....	25
2.2.2. Compensadores estáticos STATCOM.....	28
2.3. Aerogeneradores.....	29
<b>3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A SIMULAR.....</b>	<b>31</b>
3.1. Aerogenerador.....	31
3.2. Construcción de la curva $C_p - \lambda$ .....	32
3.3. Máquina de inducción trifásica con rotor en jaula de ardilla.....	36
3.4. Banco de condensadores.....	41
3.5. El transformador.....	42
3.6. Líneas eléctricas.....	44
3.7. Representación de la red eléctrica.....	46
3.8. Nudos del sistema.....	48
3.9. Módulo aerogenerador AE-61.....	50
3.10. Visualización de las señales a analizar del sistema.....	52
3.11. Módulo de simulación de una falta.....	54
3.12. Modelo completo.....	56
3.13. Modelo completo con compensador estático SVC.....	56
3.14. Modelo completo con compensador estático STATCOM.....	60
3.15. Parámetros del sistema.....	65
<b>4. SIMULACIONES.....</b>	<b>68</b>
4.1. Módulo powergui.....	68
4.2. Simulaciones modelo sin compensadores.....	73
4.2.1. Primera simulación sin compensador estático.....	74
4.2.2. Segunda simulación sin compensador estático.....	76
4.2.3. Tercera simulación sin compensador estático.....	78
4.2.4. Cuarta simulación sin compensador estático.....	80
4.2.5. Quinta simulación sin compensador estático.....	82
4.2.6. Sexta simulación sin compensador estático.....	84
4.2.7. Séptima simulación sin compensador estático.....	86
4.2.8. Octava simulación sin compensador estático.....	88
4.2.9. Novena simulación sin compensador estático.....	90

4.3.	SIMULACIONES CON COMPENSADORES ESTÁTICOS. ....	92
4.3.1.	<i>Primera simulación con compensador estático SVC.</i> .....	92
4.3.2.	<i>Segunda simulación con compensador estático SVC.</i> .....	96
4.3.3.	<i>Tercera simulación con compensador estático SVC.</i> .....	99
4.3.4.	<i>Cuarta simulación con compensador estático SVC.</i> .....	102
4.3.5.	<i>Primera simulación con compensador estático STATCOM.</i> .....	105
4.3.6.	<i>Segunda simulación con compensador estático STATCOM.</i> .....	108
4.3.7.	<i>Tercera simulación con compensador estático STATCOM.</i> .....	111
4.3.8.	<i>Cuarta simulación con compensador estático STATCOM.</i> .....	114
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b> .....	<b>117</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	<b>118</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.</b> .....	<b>119</b>
7.1.	ANEXO A.1.....	119
7.2.	ANEXO A.2.....	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.-	Molinos de viento antiguos y generadores eólicos nuevos.....	10
Figura 2.-	Barco de vela impulsado por el viento y molino eólico para bombeo de agua.....	11
Figura 3.-	Simulación por ordenador de la incidencia del aire sobre un fórmula 1. ....	11
Figura 4.-	Rotor de la máquina de inducción.....	14
Figura 5.-	Estator de la máquina de inducción. ....	14
Figura 6.-	Circuito equivalente monofásico del generador asíncrono. ....	16
Figura 7.-	Desarrollo del circuito equivalente 1. ....	16
Figura 8.-	Desarrollo del circuito equivalente 2. ....	17
Figura 9.-	Desarrollo del circuito equivalente 3. ....	17
Figura 10.-	Circuito equivalente reducido al estator. ....	18
Figura 11.-	Circuito equivalente exacto.....	18
Figura 12.-	Circuito equivalente aproximado. ....	19
Figura 13.-	Distribución de pérdidas en el generador. ....	21
Figura 14.-	Curvas Par-Velocidad de la máquina asíncrona y Zonas de funcionamiento. ....	22
Figura 15.-	Composición de la característica de un compensador SVC ideal. ....	26
Figura 16.-	Compensador estático con tres escalones de condensadores.....	26
Figura 17.-	Reactancia controlada mediante tiristores. ....	27
Figura 18.-	Curva característica de un STATCOM. ....	28
Figura 19.-	Esquema general de un STATCOM. ....	29
Figura 20.-	Volumen de extracción de la energía de la velocidad del viento. ....	30

Figura 21.- Curva característica potencia-velocidad del aerogenerador AE-61 Made. ....	34
Figura 22.- Curva característica Cp- $\lambda$ del aerogenerador AE-61 Made. ....	35
Figura 23.- Máscara del módulo de máquina asíncrona de Matlab. ....	36
Figura 24.- Circuito equivalente referido a los ejes q y d que utiliza Matlab para simular la máquina de inducción. ....	36
Figura 25.- Cuadro de diálogo de la máquina asíncrona de Matlab, configuración y parámetros. ....	38
Figura 26.- Esquema de simulación del par de la máquina de inducción teniendo en cuenta la inercia de la misma. ....	39
Figura 27.- Máscara del módulo de impedancia trifásica de Matlab. ....	41
Figura 28.- Cuadro de diálogo de carga trifásica de Matlab. ....	41
Figura 29.- Máscara de carga trifásica sólo con componente capacitiva de Matlab. ....	42
Figura 30.- Máscara por defecto del transformador en Matlab. ....	43
Figura 31.- Cuadro de diálogo del transformador de Matlab, configuración y parámetros. ....	43
Figura 32.- Máscara de los transformadores utilizados en el modelo. ....	44
Figura 33.- Esquema de simulación del modelo de una línea eléctrica en Matlab. ....	44
Figura 34.- Cuadro de diálogo de una línea trifásica en Matlab. ....	46
Figura 35.- Máscara de Fuente de tensión trifásica real en Matlab. ....	46
Figura 36.- Cuadro de diálogo de fuente de tensión real trifásica de Matlab. ....	47
Figura 37.- Máscara por defecto del nudo trifásico en Matlab. ....	48
Figura 38.- Máscara del nudo trifásico en Matlab tras configuración. ....	48
Figura 39.- Cuadro de diálogo con la configuración del nudo de 690V del modelo a simular. ....	49
Figura 40.- Cuadro de diálogo con la configuración del nudo de 20KV del modelo a simular. ....	50
Figura 41.- Máscara del modelo del aerogenerador AE-61. ....	50
Figura 42.- Modelo bajo máscara del aerogenerador AE-61. ....	51
Figura 43.- Modelo bajo máscara Data Acquisition módulo aerogenerador AE-61. ....	52
Figura 44.- Data Acquisition y Osciloscopios para visualización de las señales de sistema, aerogenerador y nudo 20KV. ....	52
Figura 45.- Modelo bajo máscara Data Acquisition visualización parámetros del aerogenerador AE-61. ....	53
Figura 46.- Ruta y configuración osciloscopios. ....	53
Figura 47.- Modelo bajo máscara Data Acquisition del nudo de 20KV. ....	54
Figura 48.- Máscara del módulo de falta trifásica de Matlab. ....	54
Figura 49.- Esquema del módulo de falta trifásica. ....	55
Figura 50.- Cuadro de diálogo del módulo de Falta trifásica de Matlab. ....	55
Figura 51.- Modelo completo a simular en Matlab sin compensadores. ....	56
Figura 52.- Máscara del módulo del compensador estático SVC. ....	56
Figura 53.- Esquema del Módulo de Matlab SVC. ....	57

Figura 54.- Curva característica del SVC de Matlab.....	57
Figura 55.- Cuadro de diálogo del Módulo SVC de Matlab y los parámetros de este módulo utilizados en el modelo.....	59
Figura 56.- Data Acquisition y osciloscopio para Mostrar las señales del SVC.....	59
Figura 57.- Modelo bajo máscara data acquisition SVC.....	59
Figura 58.- Modelo completo a simular en Matlab con SVC.....	60
Figura 59.- Máscara del módulo del compensador estático STATCOM.....	60
Figura 60.- Data acquisition y osciloscopio para mostrar las señales del STATCOM.....	61
Figura 61.- Modelo bajo máscara data acquisition STATCOM.....	61
Figura 62.- Esquema simplificado de transferencia de potencia y funcionamiento del STATCOM.....	62
Figura 63.- Esquema y Sistema de control del compensador estático STATCOM.....	62
Figura 64.- Curva característica del STATCOM de Matlab.....	63
Figura 65.- Cuadro de diálogo del Módulo STATCOM de Matlab y los parámetros de este módulo utilizados en el modelo.....	64
Figura 66.- Modelo completo a simular en Matlab con STATCOM.....	64
Figura 67.- Primera parte de los parámetros de la hoja creada por el editor de Matlab “parámetros”....	66
Figura 68.- Segunda parte de los parámetros de la hoja creada por el editor de Matlab “parámetros”...	67
Figura 69.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Steady-State Voltages and Currents .....	68
Figura 70.- Cuadro de dialogo del módulo powergui e Initial States Setting .....	69
Figura 71.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Load Flow and Machine Initialization.....	70
Figura 72.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Use LTI Viewer.....	70
Figura 73.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Generate Report .....	71
Figura 74.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Hysteresis Design Tool .....	71
Figura 75.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Compute RLC Line Parameters.....	72
Figura 76.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 1.....	74
Figura 77.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 1. ....	75
Figura 78.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 2.....	76
Figura 79.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 2. ....	77
Figura 80.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador,3.....	78
Figura 81.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 3. ....	79
Figura 82.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 4.....	80

Figura 83.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 4. ....	81
Figura 84.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensado, 5. ....	82
Figura 85.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 5. ....	83
Figura 86.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 6. ....	84
Figura 87.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 6. ....	85
Figura 88.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 7. ....	86
Figura 89.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 7. ....	87
Figura 90.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 8. ....	88
Figura 91.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 8. ....	89
Figura 92.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 9. ....	90
Figura 93.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 9. ....	91
Figura 94.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 1. ....	93
Figura 95.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 1. ....	94
Figura 96.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 1. ....	95
Figura 97.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 2. ....	96
Figura 98.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 2. ....	97
Figura 99.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 2. ....	98
Figura 100.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 3. ....	99
Figura 101.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 3. ....	100
Figura 102.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 3. ....	101

Figura 103.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 4.....	103
Figura 104.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 4.....	103
Figura 105.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 4.....	104
Figura 106.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 1.....	105
Figura 107.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 1.....	106
Figura 108.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 1.....	107
Figura 109.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 2.....	108
Figura 110.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 2.....	109
Figura 111.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 2.....	110
Figura 112.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 3.....	111
Figura 113.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 3.....	112
Figura 114.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 3.....	113
Figura 115.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 4.....	114
Figura 116.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 4.....	115
Figura 117.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 4.....	116

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Parámetros y definiciones de la teoría de máquinas asíncronas de inducción.....	24
Tabla 2.- Parámetros del aerogenerador AE-61 Made.....	33
Tabla 3.- Datos velocidad del viento y potencia para esa velocidad, del aerogenerador AE-61 Made. ....	33
Tabla 4.- Parámetros de la curva característica $C_p-\lambda$ del aerogenerador AE-61 Made.....	35
Tabla 5.- Subíndices utilizados en el módulo de la máquina de inducción de Matlab.....	36

Tabla 6.- Parámetros para la realización de la simulación del módulo de la máquina de inducción de Matlab. ....	38
Tabla 7.- Señales posibles de salida del módulo de la máquina de inducción de Matlab. ....	41
Tabla 8.- Parámetros para simulación del módulo de línea eléctrica de Matlab. ....	45
Tabla 9.- Rangos de funcionamiento del módulo de compensador estático SVC en Matlab. ....	58
Tabla 10.- Parámetros de los rangos de funcionamiento del módulo de compensador estático SVC en Matlab. ....	58
Tabla 11.- Parámetros del sistema de control del módulo de compensador estático SVC en Matlab. ....	58
Tabla 12.- Parámetros para el cálculo de transferencia de potencia en el módulo de Matlab STATCOM. ....	62
Tabla 13.- Parámetros para referencias la tensión en el módulo de Matlab STATCOM. ....	63
Tabla 14.- Parámetros primera simulación sin compensador estático. ....	74
Tabla 15.- Parámetros segunda simulación sin compensador estático. ....	76
Tabla 16.- Parámetros tercera simulación sin compensador estático. ....	78
Tabla 17.- Parámetros cuarta simulación sin compensador estático. ....	80
Tabla 18.- Parámetros quinta simulación sin compensador estático. ....	82
Tabla 19.- Parámetros sexta simulación sin compensador estático. ....	84
Tabla 20.- Parámetros séptima simulación sin compensador estático. ....	86
Tabla 21.- Parámetros octava simulación sin compensador estático. ....	88
Tabla 22.- Parámetros novena simulación sin compensador estático. ....	90
Tabla 23.- Parámetros primera simulación con compensador estático SVC. ....	92
Tabla 24.- Parámetros segunda simulación con compensador estático SVC. ....	96
Tabla 25.- Parámetros tercera simulación con compensador estático SVC. ....	99
Tabla 26.- Parámetros cuarta simulación con compensador estático SVC. ....	102
Tabla 27.- Parámetros primera simulación con compensador estático STATCOM. ....	105
Tabla 28.- Parámetros segunda simulación con compensador estático STATCOM. ....	108
Tabla 29.- Parámetros tercera simulación con compensador estático STATCOM. ....	111
Tabla 30.- Parámetros cuarta simulación con compensador estático STATCOM. ....	114

# **1. INTRODUCCIÓN.**

## ***1.1. Las energías.***

La energía es una fuente de recursos que todos y cada uno de los seres de este planeta necesitamos utilizar, por ello el ser humano ha ido evolucionando y aprendiendo diversas formas de extraer esta energía del entorno que nos rodea, como puede ser la energía solar, la energía hidráulica, la energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo o la energía eólica, para luego utilizarla en la forma que más convenga en cada momento.

La energía eólica es la energía que procede del viento y ha cobrado mucho auge durante las últimas décadas, principalmente porque es una energía limpia y con gran aceptación social actualmente, aunque en todo comienzo los entornos son reacios a los grandes cambios, esta energía no contamina y cada vez se puede abastecer mayor parte de la energía eléctrica consumida por un país.

El desarrollo tecnológico de esta energía ha sido muy notable en todos los aspectos, sobre todo en el aspecto de la eficiencia en la extracción de la energía cinética del viento, habiéndose diseñado diversos tipos de generadores eólicos.



**Figura 1.- Molinos de viento antiguos y generadores eólicos nuevos.**

## ***1.2. Evolución de los métodos de extracción de energía.***

La energía eólica es una de las primeras energías que ha conocido el ser humano y una de las primeras en utilizarse, desde tiempos muy lejanos ya se empezó a utilizar esta energía para mover los barcos por el mar a través de las velas y también para mover los mecanismos que estaban conectados a los antiguos molinos, pero es a partir de finales del siglo XX, cuando realmente se produce un gran avance en el desarrollo de los elementos capaces de extraer la energía del viento, apareciendo los primeros generadores eólicos o aerogeneradores.



Figura 2.- Barco de vela impulsado por el viento y molino eólico para bombeo de agua.

Los primeros aerogeneradores modernos que se comenzaron a fabricar eran capaces de producir poca energía, apenas unas decenas de KW en comparación con los últimos aerogeneradores, que son capaces de producir hasta varios MW, esto es un reflejo de lo que han evolucionado estos dispositivos en un periodo de tiempo muy breve, pero este incremento de producción de potencia en los generadores eólicos, se debe a la evolución de su geometría, las cuales hay muy variadas como veremos en el punto 2.3., de las dimensiones, llegando incluso a alturas de varias decenas de metros, de los mecanismos de control, como el control de paso de pala o incluso el control de orientación del aerogenerador para aprovechar mejor la incidencia del viento sobre las palas y también se debe a la mejora de las máquinas eléctricas empleadas para transformar la energía.

Además, aparte de desarrollar estos dispositivos, también se han mejorado los estudios de los emplazamientos, en función de la altura y del tipo de clima, llegando incluso a construir parques eólicos dentro del mar o en las montañas.

### 1.3. Las simulaciones.

Las simulaciones consisten en hacer experimentos de modelos reales a partir de modelos matemáticos implementados en una aplicación informática para ordenador.

Gracias a los avances tecnológicos de la informática, las simulaciones han sido una herramienta de suma importancia en el desarrollo y evolución de muchos ámbitos, como pueden ser la mecánica, la electricidad y las telecomunicaciones.

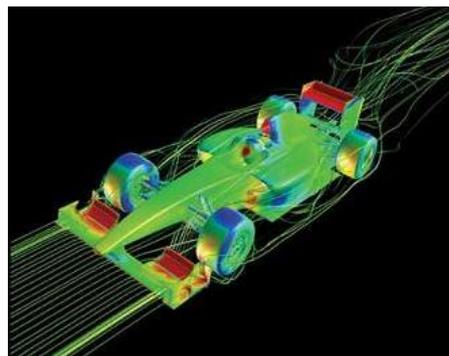


Figura 3.- Simulación por ordenador de la incidencia del aire sobre un fórmula 1.

En el uso de las simulaciones hay más ventajas que inconvenientes. Entre las ventajas más representativas de las simulaciones podemos encontrar:

1. La de reducción de costes en cualquier proceso, debido a que no se tienen que hacer de forma real todos los experimentos.
2. La versatilidad en las simulaciones, pudiendo variar parámetros y elementos del modelo real a simular.
3. Es mucho más simple que los métodos puramente analíticos (como el de ensayo y error) y muchas veces permite obtener conclusiones del comportamiento de un sistema en función de sus parámetros.
4. Las simulaciones pueden evitar enfrentarse a situaciones de riesgo tanto físico como económico, donde al ser sólo simulaciones no se produciría dicho riesgo.
5. Otra de las ventajas más relevantes, aunque podrían seguir mencionando muchas más, es la reducción del tiempo de obtención de resultados.

En cuanto a las desventajas, cabe destacar:

1. Normalmente en los modelos matemáticos se suelen hacer simplificaciones y esto puede llevar a soluciones no exactas.
2. El tratamiento inadecuado de un modelo puede generar un mayor coste si se traslada la solución obtenida a la realidad (fabricación de piezas defectuosas, toma de decisiones en base a los modelos, etc.)
3. El modelado puede llevar un tiempo de desarrollo que, dependiendo del coste y de la necesidad de innovación, podría convertirse en un proceso más lento que el de fabricación directa o implementación de la solución sin realizar el estudio del modelo.

En definitiva, las simulaciones tienen mayores ventajas que inconvenientes y sin ellas, probablemente no habiéramos evolucionado tanto en el desarrollo de la energía eólica, ni en los elementos que componen la red eléctrica.

## **1.4. Objetivos.**

Este trabajo de fin de grado, trata sobre la realización de un estudio de los generadores eólicos con rotor en jaula de ardilla, cuando se produce un cortocircuito trifásico en el punto de conexión del aerogenerador a la red eléctrica, comprobando si cumple con los requisitos establecidos en el procedimiento de operación 12.3.

Para la realización del estudio, se va a utilizar la herramienta *Simulink* del programa informático *Matlab*, en el cual se construirá el modelo del aerogenerador AE-61 conectado a una red, acorde con la potencia del generador.

Una vez construido el modelo, se va a proceder a realizar las simulaciones variando los parámetros relevantes del sistema para ver cómo estos afectan ante una falta trifásica, para el cumplimiento de la normativa vigente en el procedimiento de operación 12.3. Los parámetros

considerados más importantes a la hora de realizar el análisis son: la potencia de cortocircuito de la red, la resistencia de falta, la duración de la falta, la recuperación de la tensión y la profundidad del hueco de tensión.

Una vez vistos los parámetros de mayor importancia, en primera instancia se realizarán las simulaciones sin ningún tipo de compensador estático, a partir de este punto el objetivo será la comparación de dos diferentes tipos de compensación de energía reactiva, el primero que se verá va a ser el compensador estático SVC y el segundo será el compensador estático STATCOM, los cuales se introducirán a partir del primer modelo a simular, pudiendo ver así como mejora el comportamiento del aerogenerador ante una falta trifásica.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

### ***2.1. La máquina de inducción.***

#### ***2.1.1. Aspectos constructivos y de funcionamiento.***

Las máquinas asíncronas de inducción basan su funcionamiento en el campo magnético giratorio. Se denominan máquinas de inducción porque el flujo magnético de uno de los arrollamientos hace que aparezca una fuerza electromotriz, que provoca una circulación de corriente en el otro arrollamiento y se las denomina máquinas asíncronas porque tienen una velocidad de giro distinta a la velocidad de sincronismo.

En este proyecto solo se estudiará la máquina asíncrona con rotor en jaula de ardilla, y para ello es necesario conocer las partes que componen dicha máquina:

- Rotor, figura 4: está formado por un apilamiento de chapas de material ferromagnético de silicio, con forma cilíndrica, en las se tienen unas ranuras en la parte exterior del cilindro, dónde va colocado el devanado de cobre o aluminio. Este devanado está cortocircuitado con dos anillos de cobre o aluminio colocados en los extremos de la estructura del rotor.

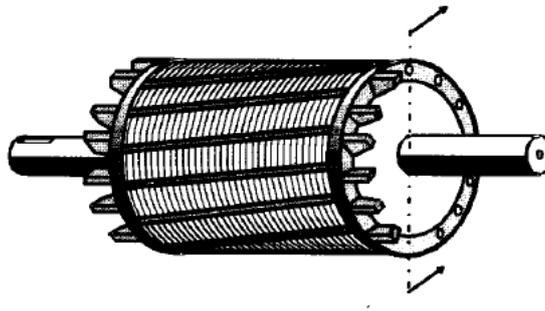


Figura 4.- Rotor de la máquina de inducción.

- Estator, figura 5: está constituido por placas apiladas de material ferromagnético de silicio, formando una estructura cilíndrica, donde hay unas ranuras en la parte interior de la estructura y donde estará alojado el devanado trifásico de cobre o aluminio desfasado 120°.

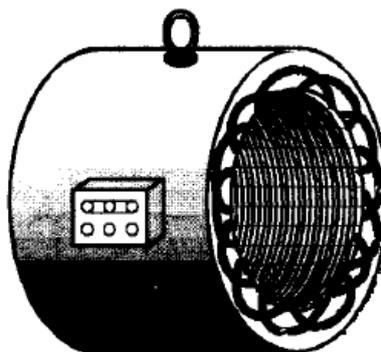


Figura 5.- Estator de la máquina de inducción.

En el caso que cabe estudiar, la máquina va a funcionar como generador y no como motor, por tanto el movimiento del generador eólico provocará el movimiento del rotor haciendo que en el estator aparezcan unas corrientes inducidas por las fuerzas electromotrices que genera el movimiento del rotor.

Para que se generen estas fuerzas electromotrices, es necesario que la velocidad del rotor sea distinta a la velocidad de sincronismo, porque si se produce el giro a la misma velocidad que la de sincronismo el rotor no provoca ninguna fuerza en el estator, ya que se anula y por tanto no aparece ninguna corriente para aportar a la red.

La fuerza electromotriz inducida, a la que a partir de ahora llamaremos f.e.m. viene determinada por la siguiente expresión:

$$\vec{e} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot l \quad (1)$$

La fuerza producida sobre una espira viene descrita por la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = i \cdot (l \cdot \vec{B}) \quad (2)$$

La velocidad de sincronismo, viene dada por la siguiente ecuación:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{P_p} \quad (3)$$

El deslizamiento de la máquina, se expresa como el porcentaje de la diferencia de la velocidad de sincronismo y la velocidad de giro de la máquina y lo determina la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Además, las frecuencias del estator y del rotor están relacionadas por el deslizamiento de la máquina, ya que la velocidad de giro y la frecuencia son proporcionales pudiendo determinar esta ecuación:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (5)$$

Las f.e.m. inducidas en los devanados del estator y rotor respectivamente son las siguientes:

$$E_1 = 4,44 \cdot K_1 \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \phi_m \quad (6)$$

$$E_{2s} = 4,44 \cdot K_2 \cdot N_2 \cdot f_2 \cdot \phi_m \quad (7)$$

De las expresiones anteriores es posible deducir la ecuación que nos relaciona la f.e.m. del rotor con la del estator, mediante el deslizamiento y la relación de transformación de la máquina, suponiendo que  $K_1 \approx K_2$ .

$$E_{2s} = s \cdot E_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (8)$$

### 2.1.2. Circuito equivalente.

El propósito del circuito equivalente de una máquina asíncrona, es crear un modelo que explique el funcionamiento de la máquina, en la que se tendrá todo referido a uno de los dos devanados de la máquina, aplicando la relación de transformación que viene determinada por  $\frac{N_2}{N_1}$ , y teniendo en cuenta que a diferencia de los transformadores, las frecuencias de los dos devanados son diferentes debido al deslizamiento dado por la expresión (5).

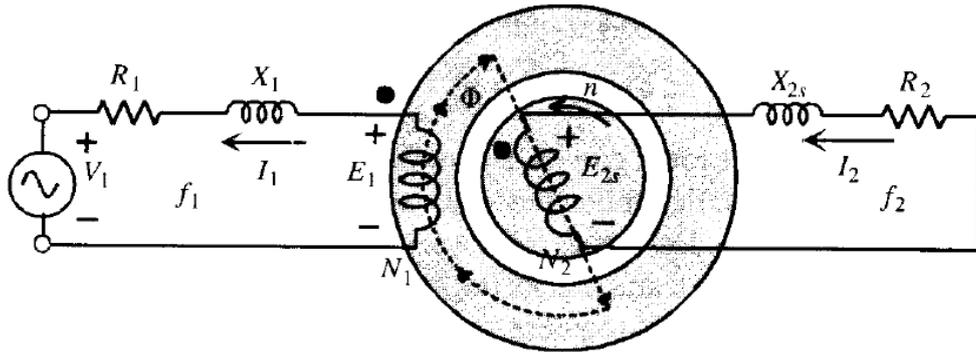


Figura 6.- Circuito equivalente monofásico del generador asíncrono.

Si se aplica la segunda ley de Kirchhoff a primario y secundario del circuito monofásico de la figura 6, se obtienen las expresiones por las cuales se rige la máquina de inducción en régimen permanente.

$$V_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + jX_1 \cdot I_1 \quad (9)$$

$$E_{2s} = R_2 \cdot I_2 + jX_{2s} \cdot I_2 \quad (10)$$

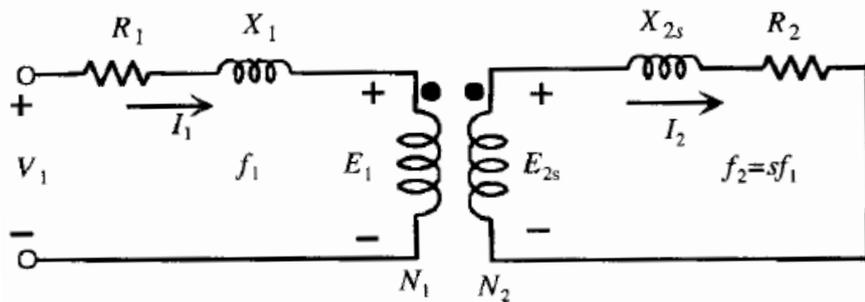


Figura 7.- Desarrollo del circuito equivalente 1.

$$X_{2s} = s \cdot X_2 \quad (11)$$

Despejando de la ecuación (10) se consigue la corriente y teniendo en cuenta la ecuación en la cual tenemos incluida la variación de frecuencias a través del deslizamiento se obtiene la siguiente expresión, donde la única frecuencia que tendremos será la del estator.

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{R_2 + js \cdot X_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (12)$$

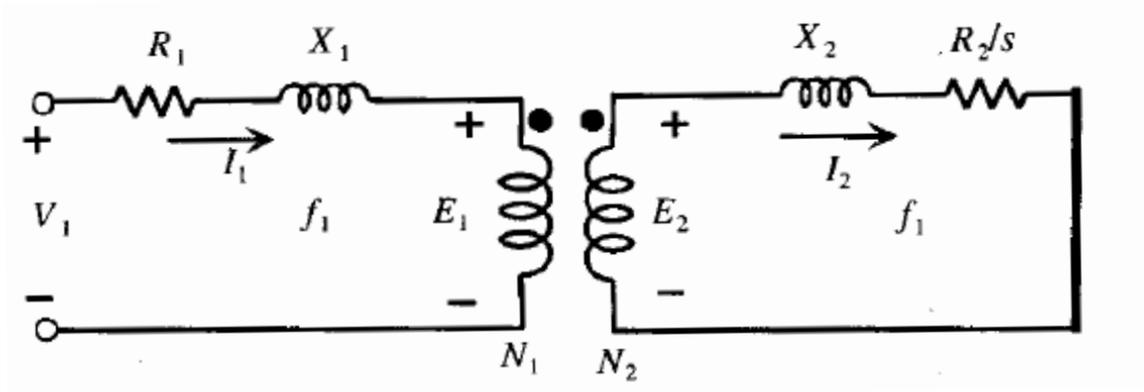


Figura 8.- Desarrollo del circuito equivalente 2.

Después de la obtención del circuito anterior se dividirá el denominador en una resistencia más, modificándolo para que se comporte igual que en el circuito de la figura 8, es decir, que los términos del denominador sean iguales.

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jX_2 + R_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right)} \quad (13)$$

Esta resistencia nueva es la que se denomina como resistencia de carga:

$$R_c = R_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right) \quad (14)$$

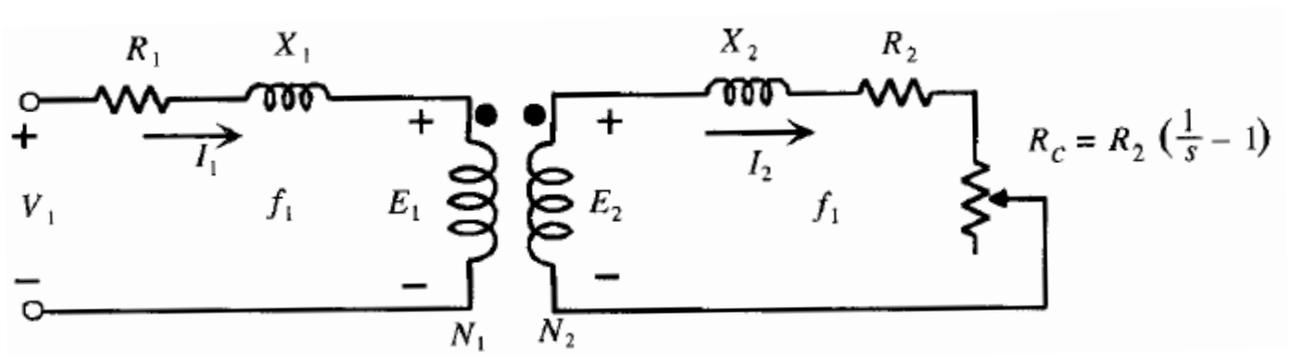


Figura 9.- Desarrollo del circuito equivalente 3.

Ahora, si se le aplican al rotor las transformaciones correspondientes de tensión y de corriente, a través de la relación de transformación se consigue reducir todo al estator quedando como resultado el circuito de la figura 10.

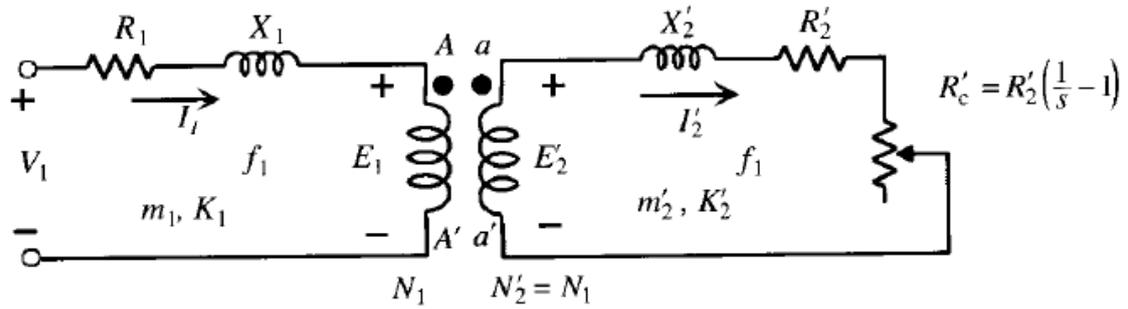


Figura 10.- Circuito equivalente reducido al estator.

El siguiente paso es la representación de la rama por la que tenemos la corriente de vacío, rigiéndose el circuito por las siguientes ecuaciones y mostrándolo en la figura 11.

$$I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m_i} \quad (15)$$

$$V_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + jX_1 \cdot I_1 \quad (16)$$

$$E'_2 = R'_2 \cdot I'_2 + jX'_2 \cdot I'_2 \quad (17)$$

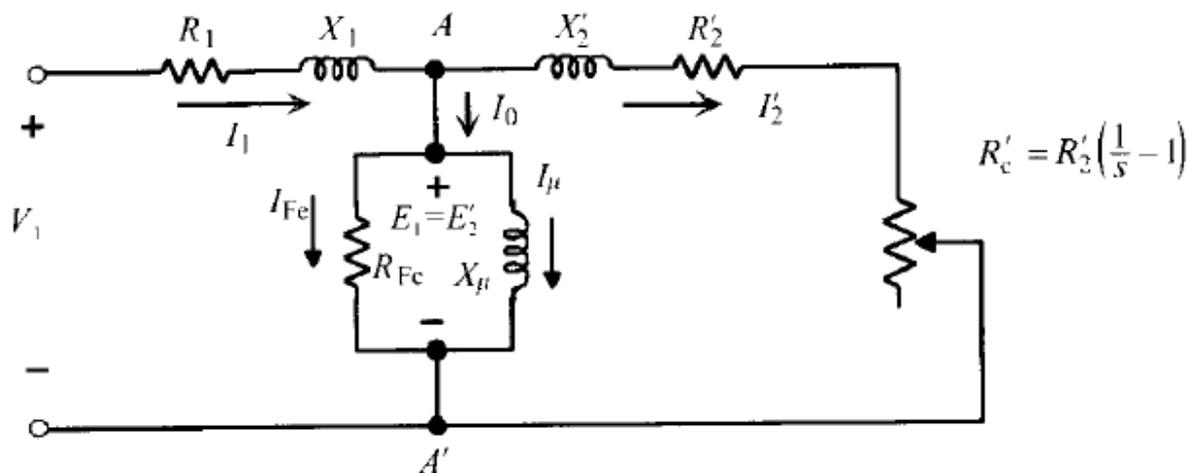


Figura 11.- Circuito equivalente exacto.

Para finalizar el circuito equivalente, sería mucho más fácil trabajar con la rama paralelo en los terminales de entrada, para ello se debe asumir un error por trasladar dicha rama, aunque en máquinas de pequeña potencia no es tan significativo el error, ya que la corriente de vacío será menor. Por tanto el circuito final con el que se trabajará es el que se muestra en la figura 12.

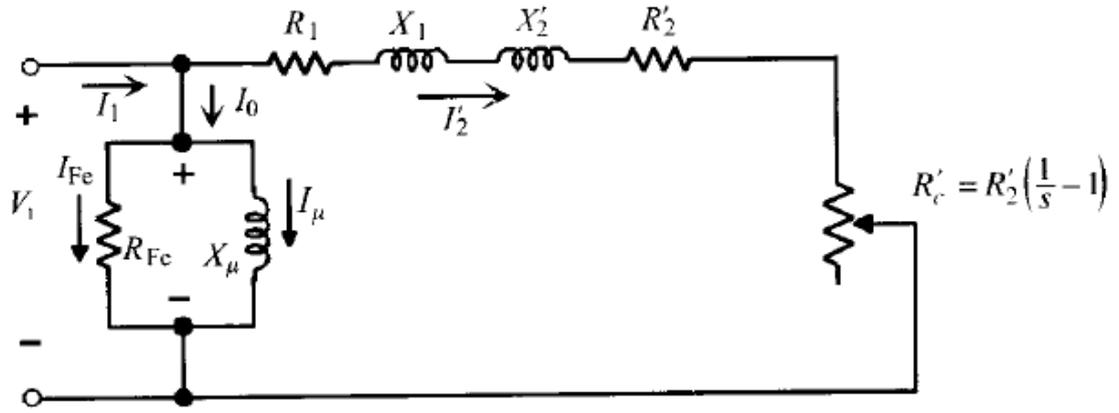


Figura 12.- Circuito equivalente aproximado.

Las ecuaciones que rigen el circuito de la figura 12 son las que aparecen a continuación.

$$V_1 = E_1 + (R_1 \cdot jX_1) \cdot I_1 \quad (18)$$

$$I_1 = I_0 + I'_2 \quad (19)$$

En el siguiente paso se la corriente que pasa por el hierro frente a la corriente que pasa por la inductancia de la máquina, quedando la corriente de vacío como.

$$I_0 = E_1 \left[ \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} \right] \approx \frac{E_1}{jX_\mu} \quad (20)$$

Habiendo hecho esta aproximación se sustituye en la ecuación (18), la ecuación (19) en la cual previamente se tiene que incluir la ecuación (20), quedando como resultado lo siguiente.

$$V_1 = E_1 + (R_1 \cdot jX_1) \cdot \left[ \frac{E_1}{jX_\mu} + I'_2 \right] \quad (21)$$

Por tanto se puede decir a través de la ecuación (17) lo siguiente.

$$E_1 = E'_2 = \left( \frac{R_2}{s} + jX'_2 \right) \cdot I'_2 \quad (22)$$

Y si se sustituye (22) dentro de la ecuación (21) se obtiene la expresión (23).

$$V_1 = \left[ R_1 + jX_1 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right] \cdot I'_2 + \frac{R_1 + jX_1}{jX_\mu} \cdot E_1 \quad (23)$$

Al igual que en la expresión (20), se ha asumido que  $X_\mu \gg R_{Fe}$ , por tanto en esta expresión el resultado final será el de la ecuación (24).

$$V'_1 = V_1 \cdot \left( 1 - \frac{X_1}{X_\mu} \right) = \left[ R_1 + jX_1 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right] \cdot I'_2 \quad (24)$$

### 2.1.3. Pérdidas.

Esta parte se centrará en tres aspectos fundamentales: en los tipos de pérdidas, en cómo afectan estas pérdidas a la entrega de potencia a la red y en la evolución de las pérdidas desde que entra el par a la máquina hasta que se entrega la energía eléctrica a la red.

Para ello se deben determinar primero todas las pérdidas que hay en la máquina de inducción:

- En primer lugar estarán las pérdidas mecánicas, que se darán a raíz de los rozamientos y del movimiento de la máquina de inducción.
- En segundo lugar está la potencia mecánica interna, que es el resultado de la potencia restante al hacer la diferencia de la potencia que entra en la máquina y las pérdidas mecánicas.

$$P_{mi} = P - P_m \quad (25)$$

- El movimiento que se produce en el rotor, como se dijo en el primer apartado de la máquina de inducción, induce unas fuerzas y unas corrientes que también son traducidas en pérdidas por efecto joule.

$$P_{cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (26)$$

- La potencia del entrehierro será la que genere el movimiento del rotor con sus corrientes y sus fuerzas menos las pérdidas que tengamos en el rotor. En el rotor se pueden considerar las pérdidas producidas en el hierro como despreciables, debido al pequeño deslizamiento que habrá en la máquina de inducción, generalmente el deslizamiento será inferior al 5%.
- La potencia que entregará el rotor al estator, vendrá determinada por la diferencia de potencia mecánica interna y las pérdidas en el cobre del rotor.

$$P_a = P_{mi} - P_{cu2} \quad (27)$$

- Al igual que en el rotor, la potencia del entrehierro tiene que ser transmitida al estator, generando unas corrientes y fuerzas en el estator que provocan unas pérdidas en el cobre y el hierro del estator, que en este caso no se pueden considerar despreciables porque aquí no tienen los 50 Hz de la red eléctrica.

$$P_{cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (28)$$

$$P_{Fe} = m_1 \cdot V_1 \cdot I_{Fe} \quad (29)$$

- La potencia final entregada a la red será por tanto la potencia que entrega el estator menos las pérdidas que se producen en el cobre y el hierro del estator.

$$P_1 = P_a - P_{cu1} - P_{Fe} \quad (30)$$

Todo el proceso de pérdidas está representado en la figura 13, en la que se observa cómo evoluciona la potencia desde que entra hasta que se obtiene la potencia eléctrica que es volcada a la red. Primero se producen las pérdidas mecánicas quedando la potencia mecánica interna, después se producen las pérdidas en el rotor en las que se desprecian las pérdidas del hierro del rotor transmitiendo esta potencia al estator a través del entrehierro, en el que ahora si aparecen unas pérdidas por el hierro en el estator y otras por cobre, quedando la potencia eléctrica como resultado de la resta de todas estas pérdidas a la potencia introducida en la máquina debido al par que generan las palas del generador eólico.

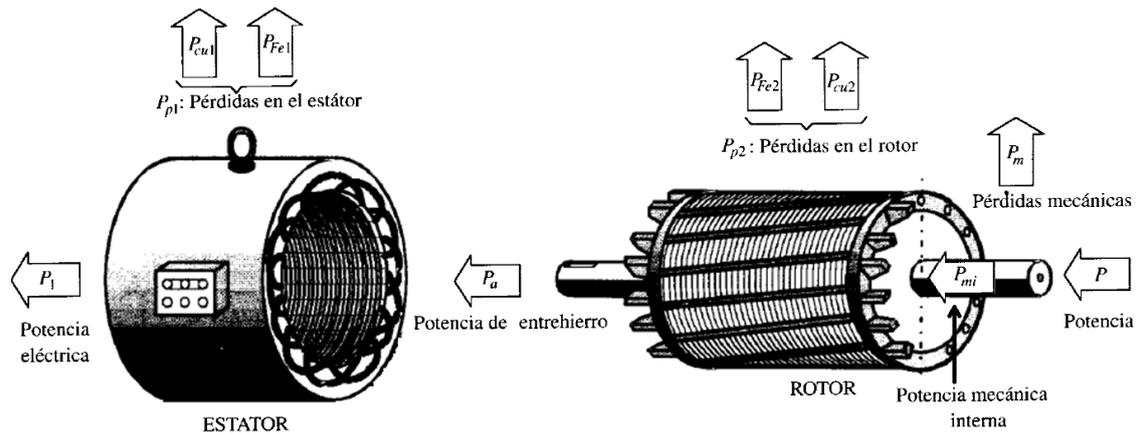


Figura 13.- Distribución de pérdidas en el generador.

#### 2.1.4. Par de rotación.

El par de rotación de una máquina eléctrica es el cociente entre la potencia y la velocidad angular:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{(2 \cdot \pi / 60) \cdot n} \quad (31)$$

Si ahora a esta expresión se le añade el deslizamiento que tiene la máquina de inducción, utilizando su definición que viene determinada por  $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$  (4), y despejando la velocidad  $n$  se obtiene la forma de incluir el deslizamiento en la expresión (31) del par de rotación.

$$T = \frac{P}{(2 \cdot \pi / 60) \cdot n_1 \cdot (1 - s)} \quad (32)$$

Teniendo en cuenta ahora que la potencia mecánica interna es  $P_{mi} = \frac{P_a}{1-s}$  (33) y sustituyendo en la ecuación (32) se obtiene como resultado la expresión (34).

$$T = \frac{P_a}{(2 \cdot \pi / 60) \cdot n_1} = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2^2}{(2 \cdot \pi / 60) \cdot n_1} \quad (34)$$

Entonces si ahora la corriente de la fórmula del par que se acaba de obtener (34), es sustituida por la expresión del módulo del circuito equivalente aproximado  $I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$  (35), y además se juntan las reactancias haciendo la suma de  $X_1 + X'_2$  como  $X_{cc}$  se consigue tener la función del par a través de los parámetros de la máquina de inducción, quedando como expresión final lo siguiente.

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot V_1^2}{(2 \cdot \pi / 60) \cdot n_1 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \quad (36)$$

Para el cálculo del par máximo se realiza la primera derivada de (36) y se iguala a cero, haciendo uso de las matemáticas para el cálculo de máximos y mínimos de una función.

En la figura 14, se muestra la curva par-velocidad de una máquina asíncrona de inducción y sus regímenes de funcionamiento. Como se ha mencionado antes, el funcionamiento como generador tiene par negativo, es decir, que el par de rotación se introduce a la máquina y realizando el proceso inverso al de un motor se consigue extraer potencia eléctrica de ese par creado por la velocidad del aire.

Además en esta curva se puede ver de forma clara el deslizamiento de la máquina, ya que operan a distintas velocidades de giro el rotor y el estator.

Otra información muy importante que muestra esta gráfica, es cuál sería la zona estable y la inestable de la máquina de inducción, la zona estable está entre el punto de la curva donde se tiene el par máximo donde la máquina funciona como motor y el punto de la curva donde se tiene el par mínimo y la máquina funciona como generador.

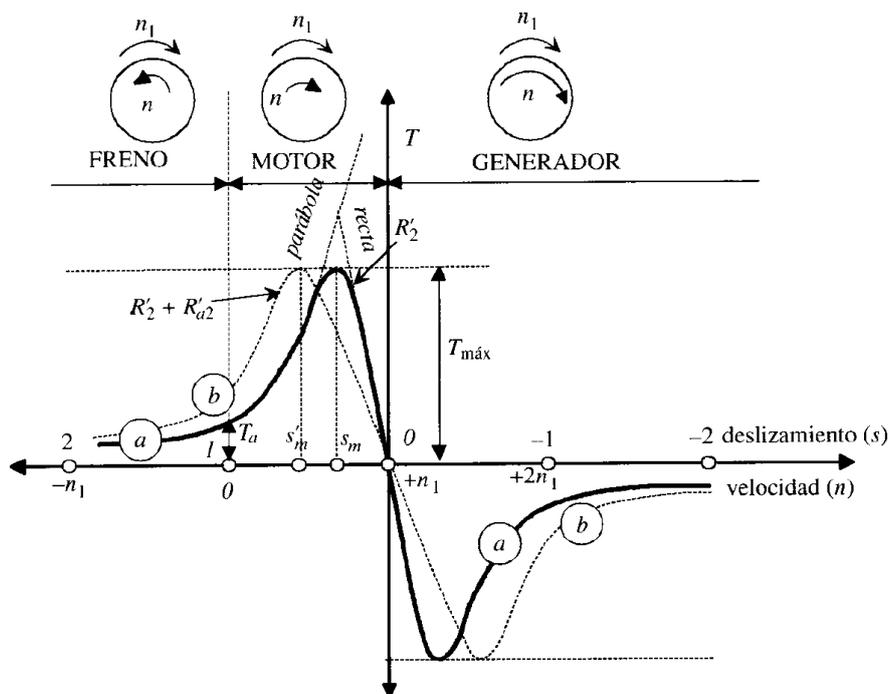


Figura 14.- Curvas Par-Velocidad de la máquina asíncrona y Zonas de funcionamiento.

### 2.1.5. Parámetros de la teoría de máquinas de inducción.

En la tabla 1 se tienen todos los parámetros necesarios y las definiciones utilizadas en la teoría de la máquina asíncrona de inducción.

Parámetros	Definición
$\vec{e}$	Fuerza electromotriz inducida
$\vec{v}$	Velocidad relativa
$\vec{B}$	Inducción magnética
$l$	Longitud de la espira o barra
$\vec{F}$	Fuerza sobre la espira
$i$	Intensidad que circula por la espira
$n_1$	Velocidad de sincronismo
$n_2$	Velocidad de las corrientes del rotor
$n$	Velocidad de giro de la máquina
$f_1$	Frecuencia del estator o de la red
$f_2$	Frecuencia del rotor
$P_p$	Par de polos
$s$	Deslizamiento
$N_1$	Número de espiras del estator
$N_2$	Número de espiras del rotor
$K_1$	Coefficiente del devanado estático
$K_2$	Coefficiente del devanado rotórico
$m_i$	Relación de transformación de corrientes
$m_1$	Número de fases del estator
$m_2$	Número de fases del rotor
$V_1$	Tensión de la red
$V'_1$	Tensión estator suponiendo $X_\mu \gg R_{Fe}$
$E_1$	f.e.m. inducida estator
$E_{2s}$	f.e.m. inducida rotor
$E'_2$	f.e.m. inducida del rotor referida al estator
$I_1$	Corriente estator
$I_2$	Corriente rotor

$I'_2$	Corriente del rotor referida al estator
$I_0$	Corriente de vacío
$I_{Fe}$	Corriente que circula por el hierro del estator
$\phi_m$	Flujo magnético que atraviesa la máquina
$R_1$	Resistencia estator
$R_2$	Resistencia rotor
$R'_2$	Resistencia del rotor referida al estator
$R_{Fe}$	Resistencia del hierro
$R_c$	Resistencia de carga
$X_1$	Reactancia estator
$X_{2s}$	Reactancia rotor
$X'_2$	Reactancia del rotor referida al estator
$X_\mu$	Reactancia del entrehierro
$X_{cc}$	Suma de reactancia del estator y del rotor
$P$	Potencia
$P_{mi}$	Potencia mecánica interna
$P_a$	Potencia del entrehierro
$P_1$	Potencia entregada a la red
$P_m$	Pérdidas mecánicas
$P_{cu1}$	Pérdidas en el cobre del estator
$P_{cu2}$	Pérdidas en el cobre del rotor
$P_{Fe}$	Pérdidas en el hierro del estator
$T$	Par de rotación de la máquina eléctrica

Tabla 1.- Parámetros y definiciones de la teoría de máquinas asíncronas de inducción.

## 2.2. Compensadores estáticos.

Estos dispositivos se utilizan para el control de tensión en zonas locales, es decir, no es un problema global como puede ser el control de frecuencia en la red eléctrica, por eso se tienen que instalar los compensadores estáticos en nudos o en cualquier zona de la red eléctrica donde se quiera elevar o disminuir la tensión para mantener la tensión dentro de los límites establecidos. Estos dispositivos reciben el nombre de compensadores estáticos porque también se puede producir potencia reactiva a través de otros elementos que no son estáticos como los generadores síncronos.

### 2.2.1. Compensadores estáticos SVC.

Los compensadores estáticos SVC, de forma simple se dice que constan de una bobina y un condensador en paralelo, los cuales se conectan a través tiristores que son un tipo de semiconductores. Lo que caracteriza a estos compensadores es que la bobina y el condensador son regulables, por tanto mediante los semiconductores se puede hacer que estos compensadores entreguen o consuman potencia reactiva con el objetivo de mantener la tensión en unos niveles estables.

Para conocer el funcionamiento de estos elementos de la forma más sencilla posible, se estudiará el caso de una bobina ajustable y un condensador en paralelo, para ello veremos en la figura 15 la característica tensión-intensidad que tenemos en la bobina ajustable y la que tenemos en el condensador, donde primero se ve el comportamiento de cada rama por separado y después se hace la superposición las dos curvas con la suma de las dos características, obteniendo como resultado final la curva característica de un compensador estático SVC.

También es posible ver en la figura 15 la rama de la bobina regulable, donde se tiene la posibilidad de movimiento en un rango determinado, el cual viene determinado por una pendiente máxima y una pendiente mínima, siendo capaces de elegir la pendiente de esta característica entre los límites de la bobina a través de un control en la correlación de la tensión e intensidad. En cuanto al condensador, al cual se ha considerado simple y sin posibilidad de ajuste, tiene una única pendiente que viene determinada por la ley de ohm y la capacidad del condensador.

$$I_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V \quad (37)$$

Al final, en la figura 15 se observa el resultado de sumar las curvas de tensión e intensidad de la bobina y el condensador, donde se pueden apreciar tres zonas: la primera es la zona capacitiva y donde está la pendiente del condensador, en la segunda zona se tiene la pendiente del cambio de rango de la bobina regulable y en la tercera zona se aprecia el rango donde la bobina trabaja con su máxima pendiente, determinando así las tres zonas en las que es capaz de operar el compensador estático SVC.

El comportamiento de estos elementos se realiza a través de la tensión de referencia que se tiene en el punto de conexión, por eso cuando la tensión está por encima de la tensión de referencia el objetivo del compensador es reducir la tensión, operando en la parte inductiva de la figura 15 y por tanto consumiendo potencia reactiva. Si se tuviera una tensión menor a la tensión de referencia en el punto de conexión, el compensador estático estaría funcionando en la zona capacitiva de la curva característica tensión intensidad del compensador y tendría que comportarse como condensador inyectando así potencia reactiva para elevar la tensión.

En este tipo de compensadores estáticos hay un pequeño inconveniente, ya que cuando la tensión es muy baja se limita el módulo de la intensidad y por tanto el aporte de energía reactiva, que depende de la corriente.

Las grandes caídas de tensión casi siempre se dan en los cortocircuitos, porque normalmente se deriva la corriente a tierra provocando tensiones muy bajas.

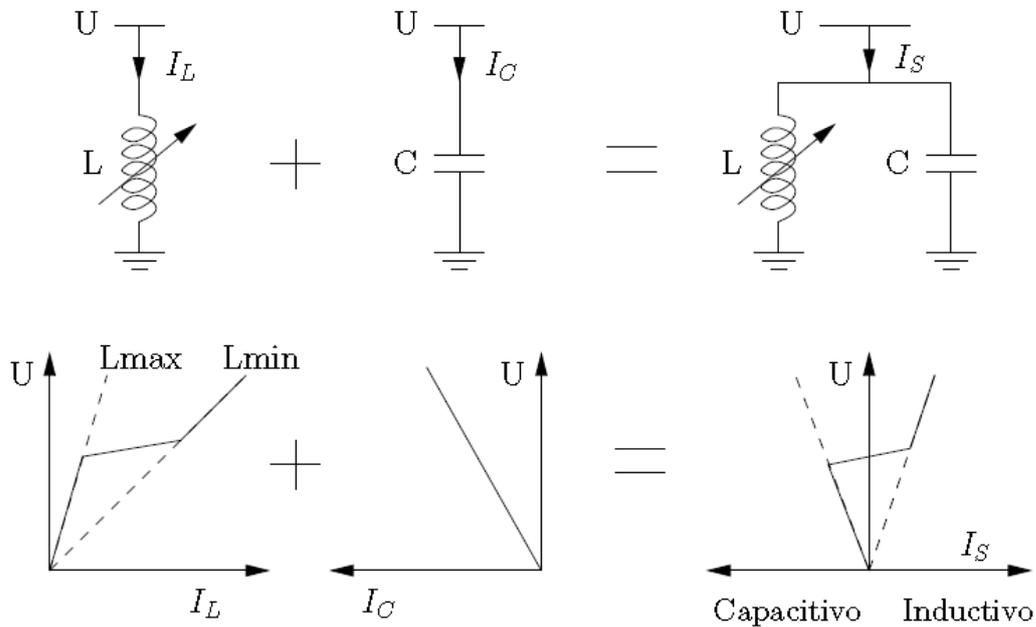


Figura 15.- Composición de la característica de un compensador SVC ideal.

Para evitar las bajas tensiones en la medida de lo posible se conectan varias etapas de condensadores en paralelo que funcionan mediante interruptores permitiendo modificar la curva característica del compensador para que inyecte más potencia reactiva.

En la figura 16 se observa cómo modificaría la curva del compensador tener tres etapas de condensadores, viendo cómo puede operar en la zona capacitiva a menores tensiones sin disminuir demasiado el módulo de corriente.

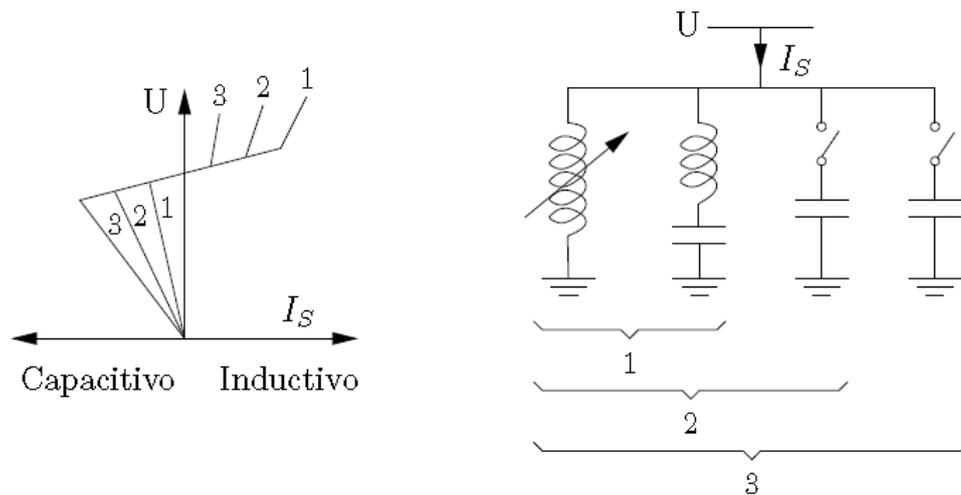


Figura 16.- Compensador estático con tres escalones de condensadores.

La reactancia ajustable se controla mediante tiristores que funcionan con un ángulo de disparo  $\alpha$  comenzando este ángulo a contar desde que la tensión es cero en ese tiristor, además solo conducen cuando están polarizados en secuencia directa, por tanto para un ángulo  $\alpha$  de  $90^\circ$  la bobina conducirá durante todo el ciclo, es decir, se tiene un ángulo de conducción  $\sigma$  de  $180^\circ$  y en caso de que aumente el ángulo  $\alpha$  se comenzará a dejar de conducir en ciertas partes del ciclo tal y como se aprecia en la figura 17.

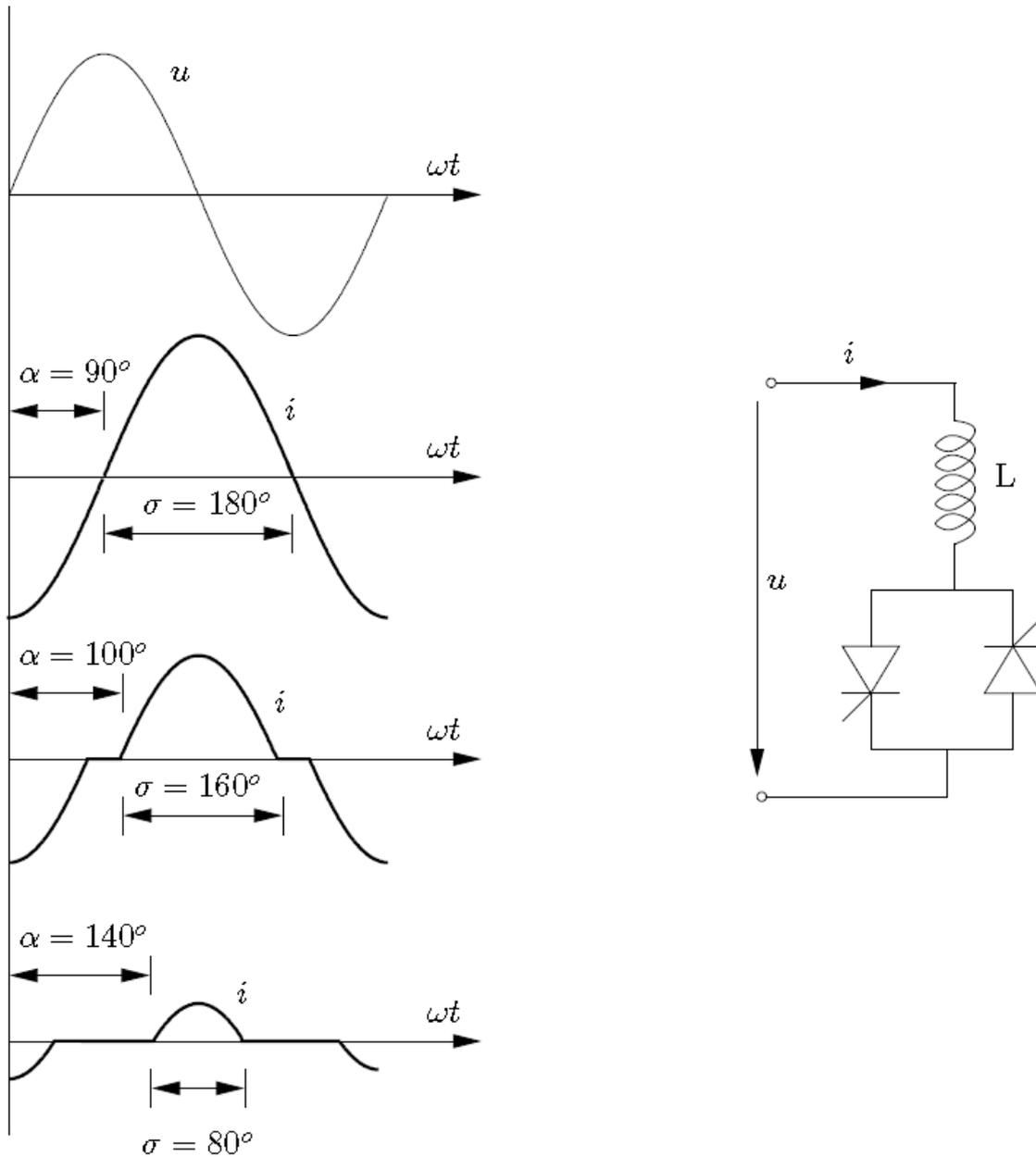


Figura 17.- Reactancia controlada mediante tiristores.

El efecto que produce que se deje de conducir en algunas partes es la distorsión de la onda, de esta manera se afirma que la bobina es regulable.

Para el control de los condensadores adicionales en paralelo también se suelen utilizar los tiristores, debido a la rápida respuesta frente a otro tipo de interruptores como pueden ser los mecánicos. Una vez conectados estos tiristores uno de los métodos para reducir las pérdidas que producen es puentearlos.

### 2.2.2. *Compensadores estáticos STATCOM.*

A parte de los SVC's se tienen otro tipo de dispositivos que también tienen como objetivo estabilizar la tensión mediante el aporte o consumo de energía reactiva como puede ser el STATCOM. Este dispositivo recibe el nombre de las palabras en inglés STATIC COMPENSATOR.

En este tipo de compensadores estáticos a diferencia de los SVC's se utiliza la modulación PWM, que utiliza como semiconductores los denominados GTO's o los IGBT's debido a que son mucho más rápidos y trabajan a frecuencias muy pequeñas.

Estos compensadores estáticos tienen una ventaja bastante grande respecto a los SVC's ya que son capaces de aportar o consumir potencia reactiva en todo tipo de situaciones, debido a que el aporte o consumo de reactiva no está condicionado por el nivel de tensión.

Esto se ve esto reflejado en la característica tensión-corriente del STATCOM de la figura 18, es decir, si se produce un cortocircuito y la tensión cae mucho no ocurre como en los SVCs que limitan el aporte de reactiva cuando las tensiones son muy bajas.

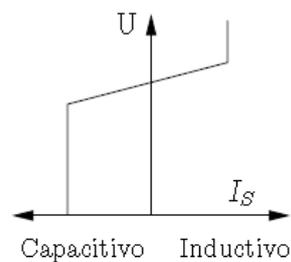


Figura 18.- Curva característica de un STATCOM.

En estos compensadores se tiene conectado el convertidor, capaz de modular a su antojo la frecuencia, la fase y la amplitud en una fuente de tensión a través de la modulación PWM entre el punto donde se quiere controlar la tensión y la etapa de corriente continua.

El esquema más simple de representar de estos compensadores estáticos se puede ver en la figura 19.

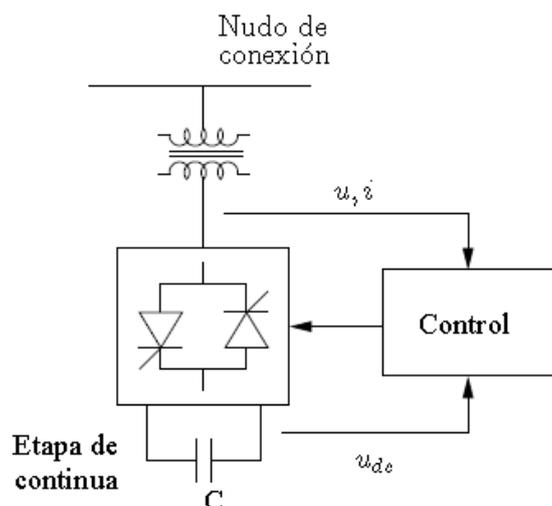


Figura 19.- Esquema general de un STATCOM.

La función de este compensador estático es medir la tensión e intensidad en el punto requerido y dependiendo de esta medida aportar o consumir energía reactiva según las necesidades instantáneas en ese punto de la red. Si se tienen tensiones altas se deberá consumir potencia reactiva, es decir, el compensador estaría trabajando como bobina, mientras que si las tensiones son bajas se deberá aportar potencia reactiva y hacer que el compensador trabaje como condensador.

El problema de estos convertidores, es el límite térmico de los conductores, esto se da para aplicaciones en las que las tensiones son muy elevadas, por ejemplo en el transporte de energía en España en el que las tensiones son de 400 kV y 220 kV.

### 2.3. Aerogeneradores.

Los generadores eólicos tienen como antecesores a los antiguos molinos de viento, de los cuales se extraía la energía cinética del viento para diversas actividades. A partir de este punto, se desarrollaron los actuales generadores eólicos o aerogeneradores, que son capaces de extraer energía mecánica de la energía cinética del viento para después transformarla en energía eléctrica a partir de diversos dispositivos.

Hay muchos tipos de aerogeneradores que se pueden clasificar según: su eje de giro en vertical y horizontal, también se pueden clasificar según el número de palas del aerogenerador donde los tenemos de una pala, de dos palas, de tres palas, además también los hay con rotor multipala, Darrieus y Savonius, otra clasificación muy importante es el tipo de paso de pala del aerogenerador, donde tenemos dos tipos de aerogeneradores, los de paso de pala fijo y los de paso de pala variable. El modelo de aerogenerador que se simulará en este proyecto es uno de tres palas con eje de giro horizontal y paso de pala fijo.

También hay que mencionar que las partes básicas de un aerogenerador son la torre, las palas, la máquina de inducción, la caja multiplicadora, la veleta, el anemómetro, el rotor, la

caja multiplicadora, la cimentación y el sistema de control, aunque algunas partes pueden variar en función del tipo de aerogenerador.

Una vez vistos los tipos de aerogeneradores y sus partes, se debe comenzar por el funcionamiento de estos y las ecuaciones por las que se rigen.

Como bien se dijo al principio de este punto, la energía se extrae del viento a través de las palas, pero para determinar de una forma precisa la energía extraída, se van a introducir primero ciertos conceptos con el apoyo de la figura 20, donde  $L$  es la longitud que atraviesa el aire en un determinado incremento de tiempo con una velocidad  $V_1$  y donde  $A$  es el área circular de barrido de las palas, constituyendo por tanto el volumen que atravesará el aire de densidad  $\rho$  a partir del cual se extraerá la energía.

El momento viene determinado por la ecuación (38), que sustituyéndolo en la expresión (39) de la energía cinética se obtiene la ecuación (40), y sabiendo que la potencia es la energía cinética dividido por el incremento de tiempo, se obtiene la potencia que podemos extraer de este volumen de aire (41).

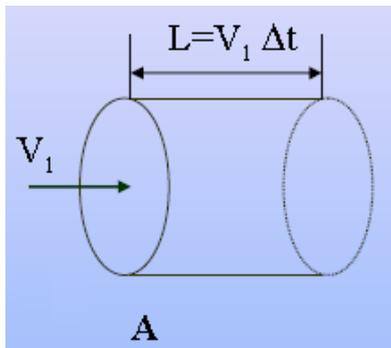


Figura 20.- Volumen de extracción de la energía de la velocidad del viento.

$$M = \rho \cdot A \cdot V_1 \cdot \Delta t \quad (38)$$

$$E_c = \frac{1}{2} M \cdot V_1^2 \quad (39)$$

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_1^3 \cdot \Delta t \quad (40)$$

$$P = \frac{E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (41)$$

Esta potencia calculada no es real, ya que no se puede extraer toda la energía cinética del aire dejándolo quieto por completo, por ello es de esperar la introducción de un nuevo coeficiente llamado coeficiente de potencia  $C_p$ , que según la teoría del disco actuador tiene un valor máximo de extracción de potencia, también denominado límite de Betz que tiene un valor máximo del 59,26%. Se puede ver el coeficiente en la ecuación (42).

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_1^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (42)$$

Como se observa en la ecuación (42) este coeficiente de potencia depende del parámetro  $\lambda$ , que recibe el nombre de coeficiente de velocidad específica y viene determinado por la ecuación (43), aunque si fuera un aerogenerador de paso de pala variable también dependería el coeficiente de potencia del parámetro del ángulo de la pala  $\beta$ .

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (43)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad de giro de la máquina, que viene determinada en la ficha técnica de cada aerogenerador,  $R$  es el radio de las palas y  $v$  es la velocidad del viento.

Pero no se tiene que olvidar que esta potencia producida por el aerogenerador no es lo que se introduce en la máquina de inducción, sino que esta potencia lleva asociado un par mecánico determinado por la división entre la potencia y la velocidad de giro, que será lo que mueva el rotor de la máquina de inducción produciendo la energía eléctrica que se volcará a la red.

Otro dato a destacar en la extracción de energía del viento, es que depende de otros parámetros los cuales no estudiaremos en este trabajo de fin de grado, aunque sí que los mencionaremos. Estos parámetros son el emplazamiento donde esté colocado el aerogenerador, es decir, si está a nivel del mar o a una altura diferente, también hay que tener en cuenta la temperatura ya que la densidad del aire varía con la temperatura, además también es importante la dirección con la que incide el viento sobre las palas, donde se ha considerado en este trabajo que el aire incide perpendicularmente y con valor constante.

Por último, los aerogeneradores de paso de pala fijo a partir de cierta velocidad del viento entran en pérdidas, disminuyendo un poco la potencia producida. Esto se puede apreciar en la figura 21 en el apartado 3.2.

### **3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A SIMULAR.**

#### ***3.1. Aerogenerador.***

Para implementar el aerogenerador en *Matlab Simulink*, el primer paso ha sido determinar cuál iban a ser las entradas en nuestro sistema, donde tenemos dos variables de entrada, la velocidad del viento y la velocidad angular del aerogenerador que han sido determinadas a través de dos constantes determinadas con el editor de *Matlab* como la señal 1 y 2 respectivamente. Con estas dos variables se ha implementado la función que corresponde a la representación de  $\lambda$  y que tiene como fórmula la ecuación (43), a través del módulo *Function* de *Matlab Simulink*.

La salida de este módulo será la correspondiente a la entrada del siguiente módulo llamado *Lookup Table*, que a partir de los datos calculados de  $\lambda$  y  $C_p$  en orden creciente es capaz mediante la interpolación de implementar la función  $C_p$ - $\lambda$  y del cual se obtiene la salida con el valor de  $C_p$ .

En el siguiente multiplexor se unen las señales de  $C_p$  y  $v$ , a través de las cuales se calcula la potencia sabiendo que los demás valores necesarios para el cálculo de la potencia son constantes. Esto se hace a través de otro módulo *Function* en el cual se ve la potencia que es extraída de las palas del aerogenerador a través de la ecuación (42).

Pero al fin y al cabo lo que se necesita conocer es el par mecánico que se introduce en la máquina de inducción para generar la energía que se vuelca a la red.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (44)$$

Para finalizar la construcción del aerogenerador, como es conocida la velocidad de giro y también se ha conseguido calcular la potencia, solo es necesario realizar la división de la potencia obtenida en el procedimiento anterior entre la velocidad de giro para conseguir el par mecánico aplicado al aerogenerador.

Este par mecánico no es el que realmente se introduce en el módulo que implementa la máquina de inducción, para ello es necesario pasarlo a (*p.u.*) dividiendo el par entre la potencia base del sistema y multiplicando por la velocidad angular nominal del aerogenerador, obteniendo así el par que se introduce en la máquina de inducción en (*p.u.*).

Una vez calculado el par mecánico a introducir en la máquina asíncrona de inducción, se verá cómo funciona la máquina utilizando el módulo de *Simulink* que se puede encontrar fácilmente en *SimPowerSystem*.

### 3.2. Construcción de la curva $C_p - \lambda$ .

Para poder implementar en *Matlab Simulink* el aerogenerador elegido que es el AE-61 de la marca Made, se necesita conocer la geometría y los parámetros de los que depende, es por ello que a partir de la ficha su ficha técnica se pueden conseguir los siguientes datos geométricos y de operación necesarios para poder realizar la simulación, Anexo A.2.

En la tabla 2 se observa que el aerogenerador opera con aire como fluido del cual se extrae la energía, por eso es de vital importancia conocer su densidad. Aunque este parámetro es variable en función de la temperatura y la altura vamos a utilizar la densidad estándar del aire a 15°C y a nivel del mar.

El radio de las palas es un dato geométrico facilitado por el fabricante que viene determinado por la suma de la longitud de la pala, la longitud del radio del buje esférico que utiliza y los alargadores. La longitud de los alargadores es de 0,5m, la pala utilizada es la LM 29.1 de longitud 29,15m y el buje tiene un radio de 0,85m.

Una vez conocido el radio de las palas se puede conocer el área que estas barren en su recorrido aplicando la fórmula del área de una circunferencia que viene determinado por  $A = \pi \cdot r^2$ .

Para finalizar con estos parámetros, hay que decir que este aerogenerador tiene dos velocidades de operación, una velocidad lenta y una rápida que son datos facilitados por el fabricante y tienen unos valores de 12,5 *r.p.m.* y 18,8 *r.p.m.* respectivamente. Para utilizar estos datos en el modelo a simular se deben pasar a unidades del sistema internacional mediante la expresión  $\omega = n_{rotor} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} (rad/s)$ .

Al tener dos velocidades en este aerogenerador se observa que se produce un cambio de velocidad de giro para una velocidad del viento determinada.

Parámetros del Aerogenerador	Valores
Densidad del aire $\rho$	1,225 (Kg/m <sup>3</sup> )
Radio de las palas $r$	30,5 (m)
Velocidad angular lenta $\omega_1$	1,309 (rad/s)
Velocidad angular rápida $\omega_2$	1,969 (rad/s)
Área de barrido de las palas $A$	2922,47 (m <sup>2</sup> )

Tabla 2.- Parámetros del aerogenerador AE-61 Made.

Con los datos de la tabla 2 no está todo lo necesario para implementar el modelo, por eso se ha de conocer la curva característica de potencia-velocidad de los datos del fabricante que se ven en la tabla 3, en la que se aprecia una velocidad mínima del aire con la que empieza a operar el aerogenerador de 3 m/s.

Esta curva es necesaria para obtener la curva característica  $C_p - \lambda$ , además es posible seguir extrayendo información importante del aerogenerador a partir de la tabla 3, por ejemplo, se observa que la potencia máxima que es posible extraer del aerogenerador es de 1350 KW y que a partir de este punto, como es un aerogenerador de paso de pala fijo hay una pérdida de carga que hace disminuir la potencia que es posible entregar, este fenómeno se aprecia mejor en la figura 21.

Velocidad (m/s)	potencia(KW)	Velocidad (m/s)	potencia(KW)
3	0	15	1332
4	31	16	1350
5	87	17	1340
6	162	18	1321
7	254	19	1296
8	404	20	1274
9	582	21	1257
10	769	22	1238
11	940	23	1232
12	1085	24	1228
13	1200	25	1227
14	1282		

Tabla 3.- Datos velocidad del viento y potencia para esa velocidad, del aerogenerador AE-61 Made.

En la figura 21 han sido representados los datos de la tabla 3 como una función, donde se observa el comportamiento del aerogenerador de una forma mucho más gráfica y donde se aprecia lo comentado en el párrafo anterior.

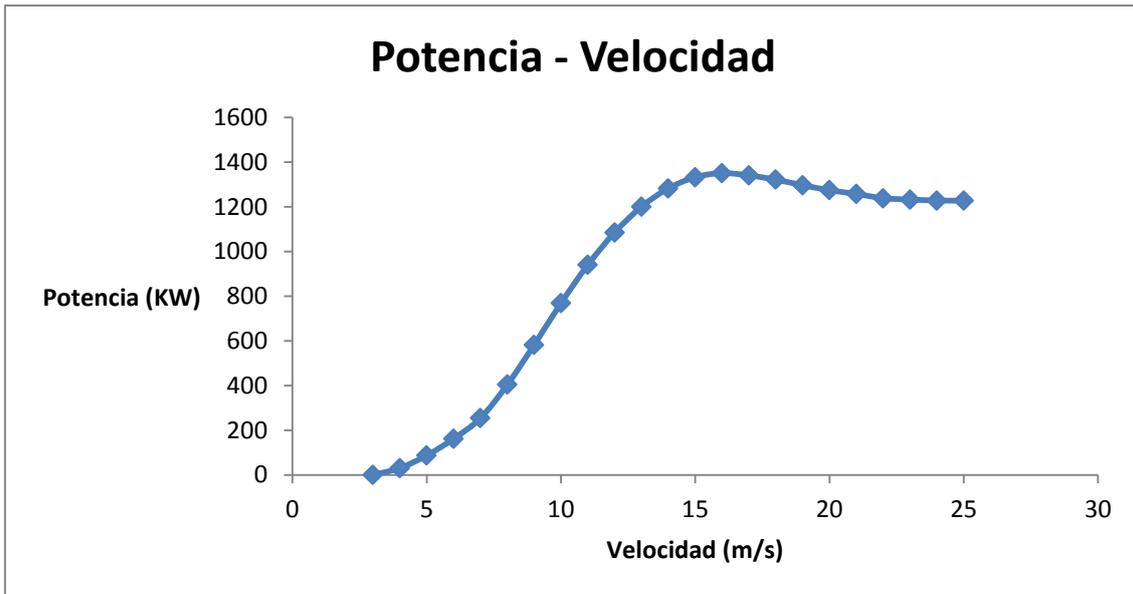


Figura 21.- Curva característica potencia-velocidad del aerogenerador AE-61 Made.

Una vez obtenida la curva de potencia-velocidad anterior, es necesario calcular la curva  $C_p - \lambda$  y para ello vamos a comenzar por calcular  $C_p$  a partir de la función que determina la potencia del aerogenerador (42), del apartado 2.3.

De la cual despejando  $C_p(\lambda)$  se consiguen los valores requeridos de todas las velocidades del viento y las potencias de la tabla 3.

$$C_p(\lambda) = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A \cdot V^3} \quad (45)$$

Una vez obtenidos los valores de  $C_p(\lambda)$ , se calcularán los valores de  $\lambda$  a partir de la ecuación (43), pero teniendo en consideración que para el cálculo de los valores del parámetro está el cambio de velocidad, donde se pasará de utilizar la velocidad angular lenta del aerogenerador a utilizar la velocidad angular rápida, por eso, aunque en la expresión (43) únicamente se ponga velocidad angular se está teniendo en cuenta el cambio de velocidad para la realización de los cálculos, utilizando en cada caso la velocidad angular correcta.

En la tabla 4 se pueden ver los valores obtenidos de la curva.

$C_p$	$\lambda$
0	13,30817
0,270599	9,981125
0,413699	8,579214
0,440814	7,506813
0,446005	6,672722
0,429606	6,00545
0,394543	5,4595
0,350776	5,004542
0,305137	4,619577

0,261005	4,289607
0,220483	4,003633
0,184127	3,753406
0,152371	3,532618
0,126541	3,336361
0,105557	3,160763
0,088966	3,002725
0,075827	2,859738
0,064953	2,72975
0,056568	2,611065
0,049626	2,502271
0,04387	2,40218

Tabla 4.- Parámetros de la curva característica  $C_p-\lambda$  del aerogenerador AE-61 Made.

En la figura 22 está representada la curva  $C_p - \lambda$ , en la que se observa el comportamiento que sigue la curva. Analizándolo se puede deducir que el punto de cambio de velocidad (representado en rojo en la figura) se da para un valor de  $\lambda = 7,5$  al que le corresponde un valor de  $C_p = 0,4408$ . También se puede sacar como conclusión de esta gráfica que la mayoría del régimen de operación es con la velocidad de giro rápida del aerogenerador.

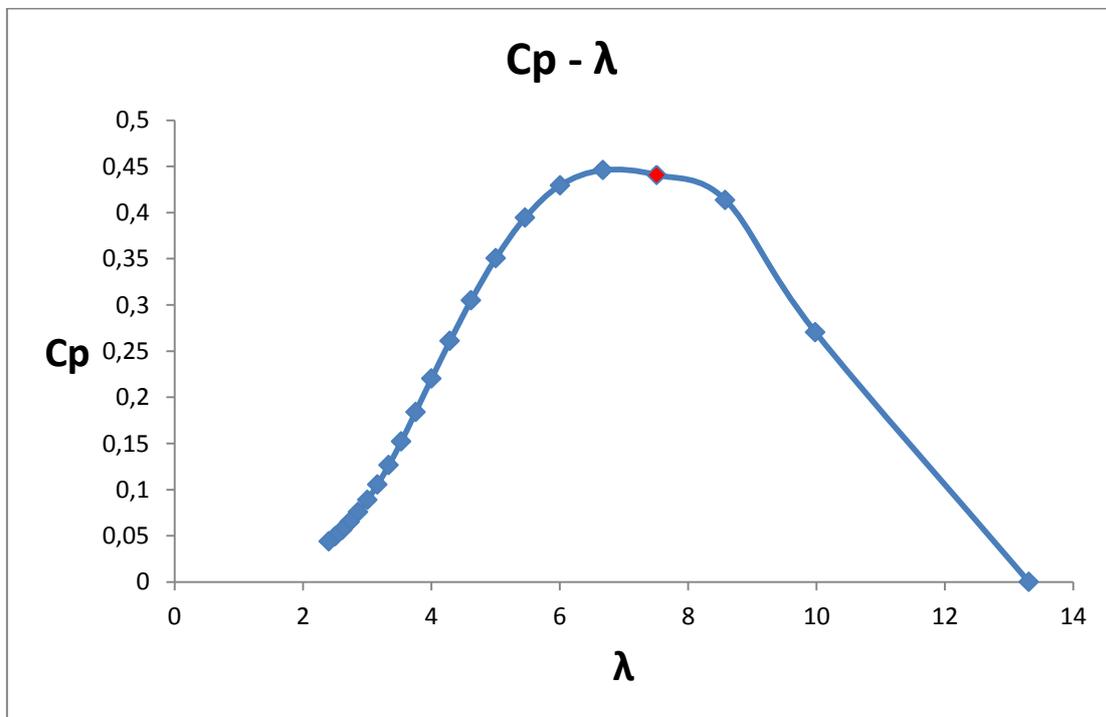


Figura 22.- Curva característica  $C_p-\lambda$  del aerogenerador AE-61 Made.

Esta es por tanto la curva que se debe implementar en el modelo de nuestro aerogenerador en *Matlab Simulink*.

### 3.3. Máquina de inducción trifásica con rotor en jaula de ardilla.

La máquina asíncrona puede funcionar como motor o también como generador y el modo en que opera la máquina depende de la señal del par de la máquina, funcionando como motor si el par es positivo y como generador si el par es negativo.

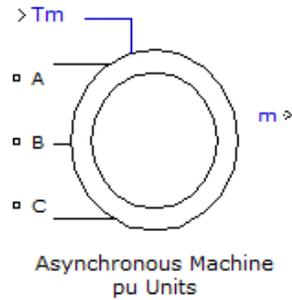


Figura 23.- Máscara del módulo de máquina asíncrona de Matlab.

La parte eléctrica de la maquina está representada por un sistema de cuarto orden y la parte mecánica por un sistema de segundo orden. Todas las variables eléctricas se refieren al estator, por tanto hay que hacer el cambio de referencia en la parte del rotor para que queden referidas al estator, además se tiene que hacer la transformación a unos ejes arbitrarios d-q. Los subíndices utilizados se ven en la tabla 5.

Subíndices	Definición
d	Eje d
q	Eje q
r	Rotor
s	Estator
l	Inductancia de dispersión
m	Inductancia magnetizante

Tabla 5.- Subíndices utilizados en el módulo de la máquina de inducción de Matlab.

El sistema eléctrico que se va a simular con la maquina eléctrica de la *SimPowerSystem* en *Matlab* es el que aparece en la figura 24.

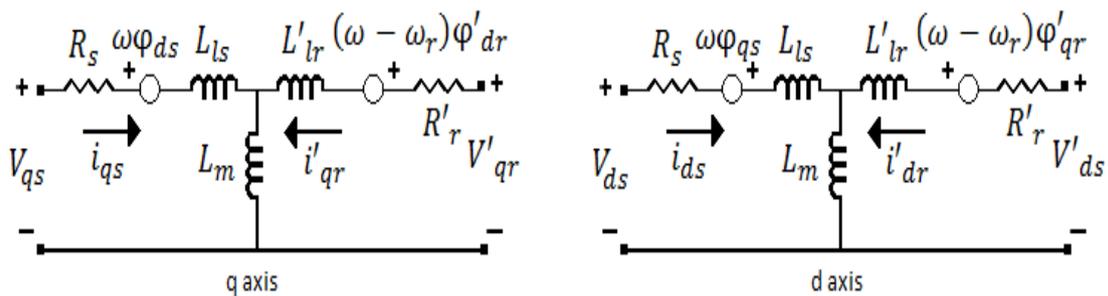


Figura 24.- Circuito equivalente referido a los ejes q y d que utiliza Matlab para simular la máquina de inducción.

Donde el programa se rige por las siguientes ecuaciones:

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega \cdot \phi_{ds} \quad (42)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \cdot \phi_{qs} \quad (43)$$

$$V'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \phi'_{qs} + (\omega - \omega_r) \cdot \phi'_{dr} \quad (44)$$

$$V'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \phi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \phi'_{qr} \quad (45)$$

$$T_e = 1,5 \cdot p \cdot (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (46)$$

En las cuales se deben introducir las siguientes expresiones:

$$\phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \quad (47)$$

$$\phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \quad (48)$$

$$\phi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (49)$$

$$\phi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (50)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (51)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (52)$$

Una vez visto cómo funciona la parte eléctrica, en la que todos los elementos están referidos al estator de la maquina asíncrona del simulador por defecto, se verán las ecuaciones por las que se rige la parte mecánica y los parámetros que necesita la máquina para realizar la simulación, tabla 6.

Parámetros	Definición
$R_s, L_{ls}$	Resistencia e inductancia de dispersión del estator
$R'_r, L'_{lr}$	Resistencia e inductancia de dispersión de rotor
$L_m$	Inductancia magnetizante
$L_s, L'_r$	Inductancia total estator y rotor
$V_{qs}, i_{qs}$	Voltaje y corriente del eje q del estator
$V_{qr}, i'_{qr}$	Voltaje y corriente del eje q del rotor
$V_{ds}, i_{ds}$	Voltaje y corriente del eje d del estator
$V_{dr}, i'_{dr}$	Voltaje y corriente del eje d del rotor
$\phi_{qs}, \phi_{ds}$	Flujo de los ejes q y d del estator
$\phi'_{qr}, \phi'_{dr}$	Flujo de los ejes q y d del rotor
$\omega_m$	Velocidad angular del rotor
$\theta_m$	Posición angular del rotor

$p$	Número de pares de polos
$\omega_r$	Velocidad angular eléctrica ( $\omega_m \cdot p$ )
$\theta_r$	Posición angular eléctrica del rotor ( $\phi_m \cdot p$ )
$T_e$	Par electromagnético
$T_m$	Par mecánico del eje
$J$	Coficiente total de inercia del rotor y la carga
$H$	Constante total de inercia del rotor y la carga
$F$	Coficiente de fricción total del rotor y la carga

Tabla 6.- Parámetros para la realización de la simulación del módulo de la máquina de inducción de Matlab.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad (53)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (54)$$

Cuando se hace doble clic con el botón izquierdo del ratón en el módulo de la máquina de inducción aparecerá el siguiente cuadro de dialogo, en el cual se elegirá la configuración que se ve en la parte izquierda de la figura 25, seleccionando el par mecánico de entrada que lo introduciremos en (*p. u.*), con el rotor en jaula de ardilla, tomando como referencia el rotor y las unidades de la máquina en por unidad.

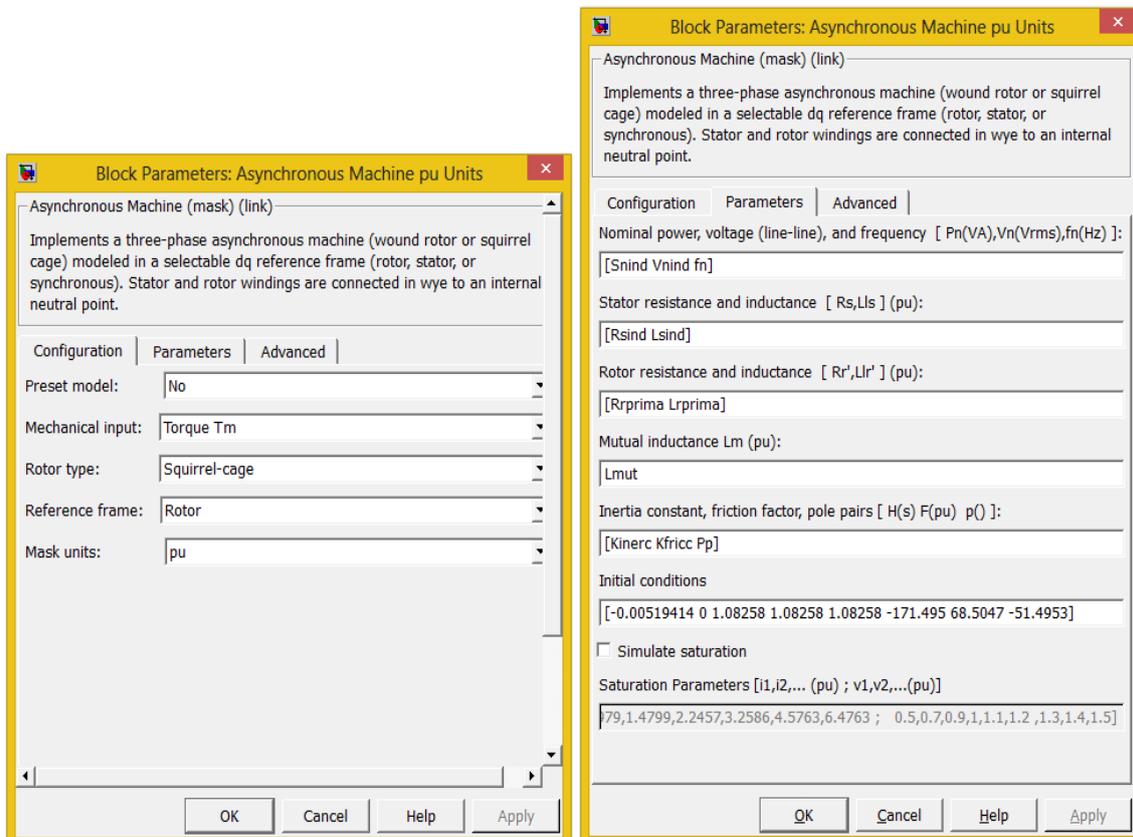


Figura 25.- Cuadro de diálogo de la máquina asíncrona de Matlab, configuración y parámetros.

En la siguiente pestaña del cuadro de dialogo hay que introducir los parámetros de la máquina, los cuales se pueden ver en la parte derecha de la figura 25 donde los valores numéricos que introduciremos se verán más adelante en el apartado 3.15.

Una vez se tiene el par mecánico que hay que introducir, el par electromagnético interno de la máquina se calcula a partir de la inercia  $J$  que tiene en la máquina haciendo que el par electromagnético introducido en la máquina sea un poco menor.

En el momento de inercia, el simulador tiene en cuenta la relación de multiplicación de la máquina de inducción haciendo las conversiones correspondientes para tener todo el sistema mecánico, al igual que el eléctrico referido a una de las dos partes de la máquina a través del sistema mostrado en la figura 26.

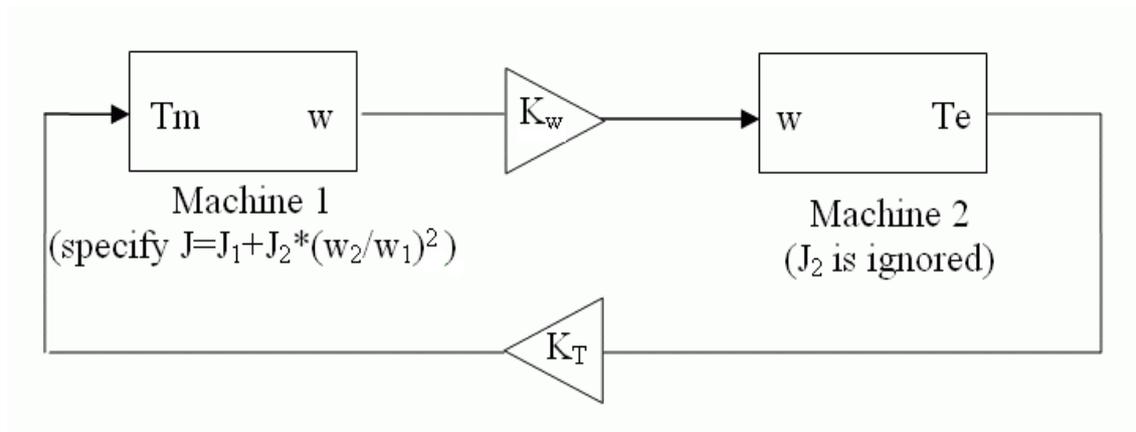


Figura 26.- Esquema de simulación del par de la máquina de inducción teniendo en cuenta la inercia de la misma.

Para pasar las tensiones fase-fase de un marco de referencia abc a uno dq se hace uso de las siguientes ecuaciones matriciales:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\text{sen}\theta \\ 2\text{sen}\theta & \text{sen}\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\beta & \cos\beta + \sqrt{3}\text{sen}\beta \\ 2\text{sen}\beta & \text{sen}\beta - \sqrt{3}\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (56)$$

En las ecuaciones que preceden  $\theta$  es la posición angular de referencia, mientras que  $\beta = \theta - \theta_r$  es la diferencia entre la posición del marco de referencia y la posición eléctrica del rotor.

Como los terminales de la máquina están conectados en estrella no hay componente homopolar y esto justifica que se utilicen los voltajes de entrada línea-línea en vez de tres tensiones fase-neutro.

Al igual que se ha realizado la transformación anterior se hace lo mismo con las corrientes, transformándolas de un marco de referencia  $dq$  a uno  $abc$ .

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\text{sen}\theta}{2} \\ \frac{-\cos\theta + \sqrt{3}\text{sen}\theta}{2} & \frac{-\sqrt{3}\cos\theta - \text{sen}\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\beta}{2} & \frac{\text{sen}\beta}{2} \\ \frac{-\cos\beta + \sqrt{3}\text{sen}\beta}{2} & \frac{-\sqrt{3}\cos\theta - \text{sen}\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs} \quad (59)$$

$$i'_{cr} = -i'_{ar} - i'_{br} \quad (60)$$

Si se toma como referencia el rotor como es el caso  $\theta = \theta_r$  y  $\beta = 0$ . Esto puede afectar en los resultados y en las transformaciones si se hace una mala elección de la referencia, por esto, en el caso que cabe se debe elegir el rotor como referencia entre las opciones que se presentan que son: rotor, estacionario y síncrono.

Teniendo como señal de entrada el par electromagnético en la turbina, la tabla 7 muestra los valores de salida que puede entregar la máquina de inducción, de los cuales a través del multiplexor de salida de la máquina se podrá elegir cuál de estas señales de salida se quieren mostrar. Una vez elegidas estas señales estas se podrá ver a partir del elemento de medida de señales *Scope*, es decir, a través del osciloscopio.

En el caso de estudio, la señal que más interesa es la velocidad angular de rotación de la máquina de inducción, ya que una parte importante de las simulaciones está relacionada con el tiempo que es capaz la máquina de inducción de soportar una cortocircuito trifásico sin perder la estabilidad de la máquina, es decir, sin que la máquina siga acelerándose aunque se haya despejado correctamente dicho cortocircuito.

Señal	Definición	Unidades
$i'_{ra}$	Corriente del rotor a	(A) o (p. u.)
$i'_{rb}$	Corriente del rotor b	(A) o (p. u.)
$i'_{rc}$	Corriente del rotor c	(A) o (p. u.)
$i'_{qr}$	Corriente del rotor q	(A) o (p. u.)
$i'_{dr}$	Corriente del rotor d	(A) o (p. u.)
$\phi'_{qr}$	Flujo del rotor q	(Vs) o (p. u.)
$\phi'_{dr}$	Flujo del rotor d	(Vs) o (p. u.)
$V'_{qr}$	Tensión del rotor q	(V) o (p. u.)
$V'_{dr}$	Tensión del rotor d	(V) o (p. u.)
$i_{sa}$	Corriente del estator a	(A) o (p. u.)
$i_{sb}$	Corriente del estator b	(A) o (p. u.)
$i_{sc}$	Corriente del estator c	(A) o (p. u.)
$i_{qs}$	Corriente del estator q	(A) o (p. u.)
$i_{ds}$	Corriente del estator d	(A) o (p. u.)

$\phi_{qs}$	Flujo del estator q	(Vs) o (p.u.)
$\phi_{ds}$	Flujo del estator d	(Vs) o (p.u.)
$V_{qs}$	Tensión del estator q	(V) o (p.u.)
$V_{ds}$	Tensión del estator d	(V) o (p.u.)
$\omega_m$	Velocidad angular del rotor	(rad/s)
$T_e$	Par electromagnético	(Nm) o (p.u.)
$\theta_m$	Ángulo del rotor	(rad)

Tabla 7.- Señales posibles de salida del módulo de la máquina de inducción de Matlab.

### 3.4. Banco de condensadores.

El banco de condensadores para compensar el consumo de potencia reactiva que tiene el aerogenerador se va a simular a través del módulo *Three-Phase series RLC Load*, el cual se puede encontrar en la librería de *Simulink* en *SimPowerSystems*.

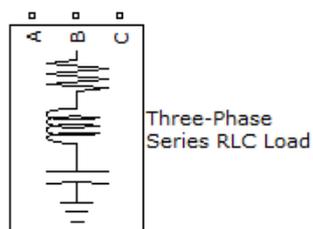


Figura 27.- Máscara del módulo de impedancia trifásica de Matlab.

Para que este módulo funcione como un banco de condensadores, es decir, sin componente resistiva ni inductiva debe ser configurado en su cuadro de diálogo tal y como aparece en la figura 28.

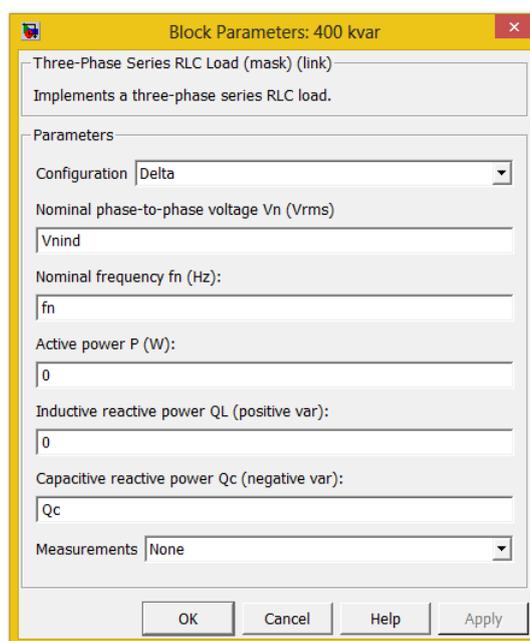


Figura 28.- Cuadro de diálogo de carga trifásica de Matlab.

Una configuración típica de los bancos de condensadores es conectada en triángulo, por tanto en la primera opción del cuadro de dialogo se ha decidido seleccionar la configuración delta.

A continuación hay que introducir el valor de la tensión de la zona en la que se encuentra el banco de condensadores, la frecuencia nominal del sistema y eliminar las componentes resistiva e inductiva, dando así un valor nulo a la potencia activa y a la potencia reactiva inductiva.

Para terminar con la configuración se asigna el valor de la capacidad de potencia reactiva que tendrá el banco de condensadores utilizado en el modelo a simular, donde el valor de la capacidad del banco de condensadores asignado es de:

$$Q_c = 400\text{KVAR}$$

La imagen que se muestra en el modelo de la simulación no es el de la figura 27, ya que han sido eliminadas las componentes resistiva e inductiva y *Matlab* cambia la máscara a mostrar dependiendo de los parámetros mostrando finalmente en el modelo la figura 26.

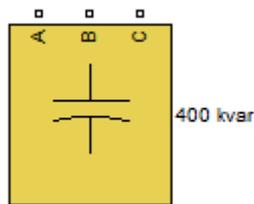


Figura 29.- Máscara de carga trifásica sólo con componente capacitiva de Matlab.

### 3.5. El transformador.

Este elemento dentro del entorno eléctrico es uno de los más importantes que se pueden encontrar, prueba de ello es que en el modelo del aerogenerador con la red simple que se va a representar tiene tres transformadores y estos son los elementos capaces de cambiar el nivel de tensión en cada una de las zonas y son los que determinan la puesta a tierra de una red eléctrica completa, por tanto, se explicará cómo la herramienta *Simulink* realiza la simulación de estos elementos tan importantes.

Hay diferentes tipos de transformadores: trifásicos, monofásicos, de dos devanados, de tres devanados, autotransformadores, pero solo se estudiarán los transformadores trifásicos con dos devanados o arrollamientos, ya que son los utilizados en el modelo que se simulará.

Este elemento se puede encontrar en la librería de la herramienta *Simulink* de *Matlab*, en *SimPowerSystem, Elements*, con el nombre de *Three-Phase Transformer (Two Windings)* y se representan por defecto por la figura 30.

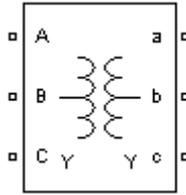


Figura 30.- Máscara por defecto del transformador en Matlab.

La simulación de estos transformadores trifásicos se implementa a partir de tres transformadores monofásicos, uno para cada una de las fases. Se pueden simular con el núcleo del transformador saturable o con una relación lineal poniendo los parámetros adecuados en el cuadro de diálogo del transformador.

Los arrollamientos primario y secundario del transformador tienen múltiples posibilidades de conexión cada uno de ellos: se pueden conectar en estrella, en estrella con acceso al neutro del transformador, estrella directamente conectada a tierra, triángulo, el cual no tiene acceso al neutro a menos que se cree un acceso artificial. Las conexiones en triángulo en *Matlab simulink* pueden tener diferentes desfases y se determinan por las horas del reloj representando cada hora un valor de desfase de 30°.

En el modelo a simular se tiene un transformador de puesta a tierra en el que no se conectan los terminales de uno de los arrollamientos dejando su configuración en triángulo, es decir, conectando solamente uno de los arrollamientos con configuración en estrella a las líneas e intercalando entre la salida del neutro del transformador y tierra, una resistencia.

En el cuadro de dialogo de este elemento se podrán modificar todos los parámetros mencionados anteriormente sobre este elemento, figura 31.

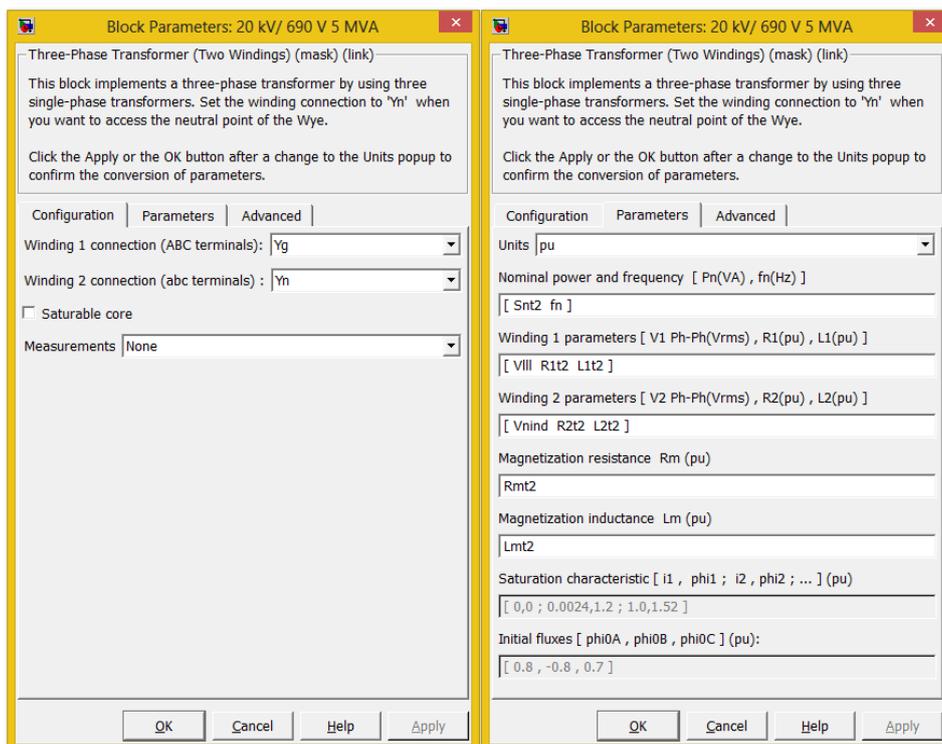


Figura 31.- Cuadro de diálogo del transformador de Matlab, configuración y parámetros.

Dependiendo de las elecciones que se hagan en el cuadro de diálogo de la figura 31, la máscara del transformador se ve modificada como no podía ser de otra manera, ya que si se quiere tener acceso al neutro del transformador debe haber una salida más en el arrollamiento del transformador donde se encuentre el neutro.

En la figura 32 se verá la máscara que utiliza el transformador con las configuraciones utilizadas en los transformadores del modelo a simular. El primero es el transformador elevador de tensión para entregar la energía directamente a la red, el segundo es el transformador elevador desde la tensión de la máquina asíncrona de inducción hasta la tensión de la subestación eléctrica y por ultimo tenemos el transformador de puesta a tierra.

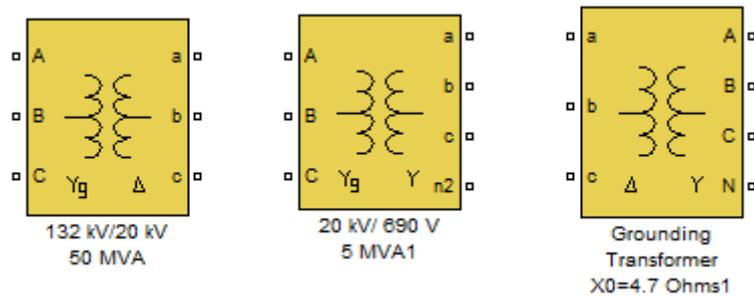


Figura 32.- Máscara de los transformadores utilizados en el modelo.

### 3.6. Líneas eléctricas.

Las líneas eléctricas son las encargadas de unir los dispositivos eléctricos a cierta distancia y van a ser simuladas a partir del módulo *Three-phase PI Selección Line*, que se puede encontrar en la misma ruta que los transformadores en *Simulink*.

El esquema que siguen las líneas eléctricas conectadas a dos elementos en cada uno de sus extremos es el que se ve en la figura 33, donde además se observan las resistencias e inductancias en serie, tanto propia como mutua y las capacidades por fase de las líneas y de tierra en paralelo.

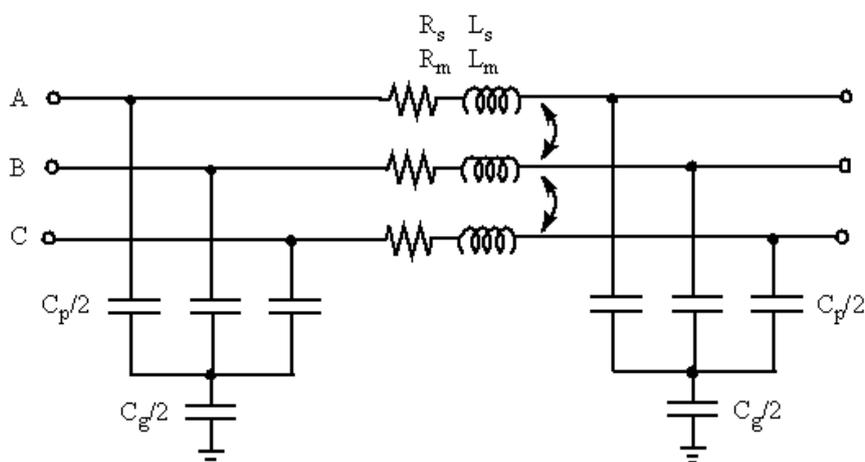


Figura 33.- Esquema de simulación del modelo de una línea eléctrica en Matlab.

Este módulo, asume que las tres líneas en su funcionamiento normal están equilibradas y los parámetros de la línea se deducen a partir de los parámetros de secuencia directa y secuencia homopolar.

Parámetro	Definición	Unidades
$r_1$	Resistencia por unidad de longitud secuencia directa	$(\Omega/Km)$
$r_0$	Resistencia por unidad de longitud secuencia homopolar	$(\Omega/Km)$
$l_1$	Inductancia por unidad de longitud secuencia directa	$(H/Km)$
$l_0$	Inductancia por unidad de longitud secuencia homopolar	$(H/Km)$
$c_1$	Capacitancia por unidad de longitud secuencia directa	$(F/Km)$
$c_0$	Capacitancia por unidad de longitud secuencia homopolar	$(F/Km)$
$f$	Frecuencia	$(Hz)$
$l_{sec}$	Longitud de la línea	$(Km)$

Tabla 8.- Parámetros para simulación del módulo de línea eléctrica de Matlab.

Primero hay que evaluar los parámetros resistivos, inductivos y capacitivos incluyendo las correcciones hiperbólicas que utiliza *Matlab* para estas simulaciones, donde los factores de corrección hiperbólicos son  $k_{r1}$ ,  $k_{l1}$ ,  $k_{c1}$ ,  $k_{r0}$ ,  $k_{l0}$  y  $k_{c0}$ , utilizados respectivamente en las siguientes ecuaciones para obtener los parámetros deseados.

$$R_1 = r_1 \cdot l_{sec} \cdot k_{r1} \quad (61)$$

$$L_1 = l_1 \cdot l_{sec} \cdot k_{l1} \quad (62)$$

$$C_1 = c_1 \cdot l_{sec} \cdot k_{c1} \quad (63)$$

$$R_0 = r_0 \cdot l_{sec} \cdot k_{r0} \quad (64)$$

$$L_0 = l_0 \cdot l_{sec} \cdot k_{l0} \quad (65)$$

$$C_0 = c_0 \cdot l_{sec} \cdot k_{c0} \quad (66)$$

Para líneas con una longitud inferior a  $50Km$  los factores de corrección hiperbólicos son despreciables porque se acercan mucho al valor unidad, pero en líneas de longitud mayor a  $50Km$  sí que se deben tener en cuenta estos factores para poder simular un modelo exacto de línea. Los parámetros utilizados en el esquema de la figura 33 se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$R_s = \frac{(2R_1 + R_0)}{3} \quad (67)$$

$$L_s = \frac{(2L_1 + L_0)}{3} \quad (68)$$

$$R_m = \frac{(R_0 - R_1)}{3} \quad (69)$$

$$L_m = \frac{(L_0 - L_1)}{3} \quad (70)$$

$$C_p = C_1 \quad (71)$$

$$C_g = \frac{3C_1C_0}{C_1 - C_0} \quad (72)$$

En el cuadro de diálogo de este módulo de *Simulink*, figura 34, se introducirán los valores RLC en secuencia directa y homopolar, la frecuencia y la longitud de la línea para la realización de las simulaciones.

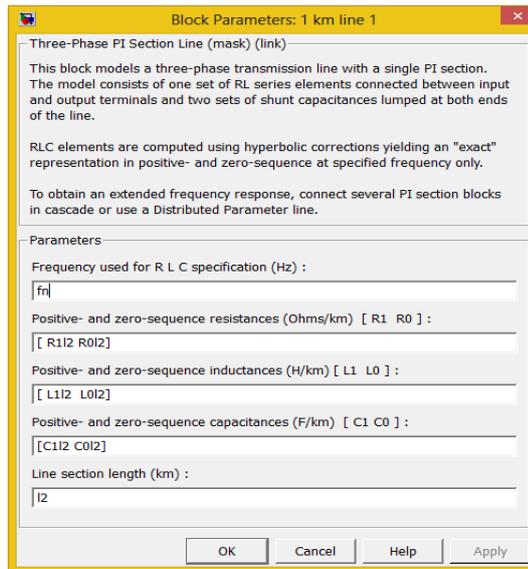


Figura 34.- Cuadro de diálogo de una línea trifásica en Matlab.

### 3.7. Representación de la red eléctrica.

Para la simulación de la red eléctrica a la que está conectada el aerogenerador se usará el elemento que recibe el nombre de *Three-Phase Source*, el cual se encuentra en la librería de *Simulink*, en *Electrical Sources* dentro de *SimPowerSystem*. Este elemento simula una fuente de tensión real con su impedancia y su potencia de cortocircuito y la máscara del módulo es la que aparece en la figura 35.



Figura 35.- Máscara de Fuente de tensión trifásica real en Matlab.

Para el cálculo de la impedancia este módulo de *Simulink* se rige por las siguientes ecuaciones para calcular la inductancia y la resistencia respectivamente.

$$L = \frac{(V_{base})^2}{S_{cc}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (73)$$

$$R = \frac{X}{(X/R)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{(X/R)} \quad (74)$$

En la figura 36 aparece el cuadro de diálogo de este módulo y como se realiza su configuración para que simule a la perfección la red eléctrica del modelo a simular.

En primer lugar se tiene que introducir el valor de la tensión de línea a la que se encuentra nuestra red que es de 132 kV y el desfase en grados. En segundo lugar al igual que en todos los elementos se debe indicar a la frecuencia que está operando el módulo, que tiene un valor de 50 Hz y la conexión que va a tener en el extremo el generador.

Para simplificar el modelo se ha decidido elegir la opción de conexión en estrella con el neutro a tierra directamente. Después de esto se ha seleccionado la opción de especificar la potencia de cortocircuito porque va a ser uno de los parámetros que se variarán constantemente en las simulaciones.

Para finalizar hay que especificar la tensión base de la zona en la que está el generador que también es de 132 KV y el ratio de la reactancia dividido por la resistencia que se ha dejado en el valor por defecto de *Matlab*.

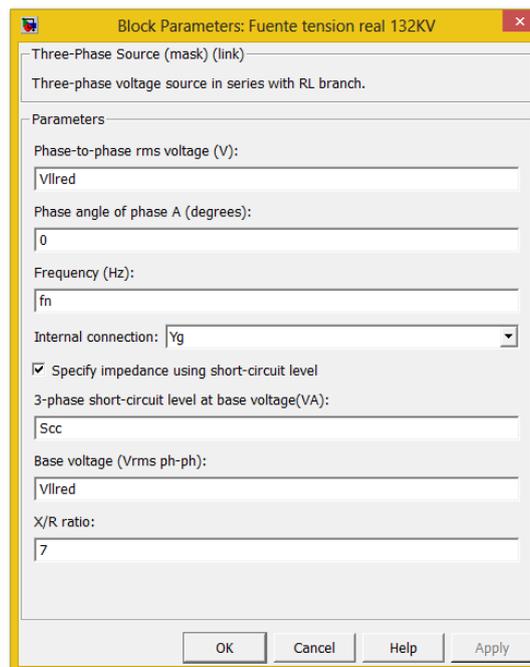


Figura 36.- Cuadro de diálogo de fuente de tensión real trifásica de Matlab.

### 3.8. Nodos del sistema.

Para representar los nodos del sistema se hará uso del módulo *Three-Phase V-I Measurement*, el cual se encuentra en *Measurements*, dentro de *SimPowerSystem* en la librería de *Matlab Simulink*.

En la figura 37 se observa la máscara del módulo, que varía en función de la configuración del mismo. En el modelo a simular hay dos nodos, uno de 20kV y otro de 690V.

En el nudo de 690V la máscara y las salidas del módulo vienen determinadas en la figura 37 y en el nudo de 20kV se verá la máscara modificada ya que no se quiere que se vean las salidas de tensión y corriente de este nudo quedando la máscara de este nudo de la forma que muestra la figura 38.

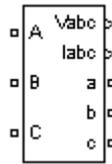


Figura 37.- Máscara por defecto del nudo trifásico en Matlab.

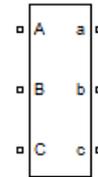


Figura 38.- Máscara del nudo trifásico en Matlab tras configuración.

Este módulo puede mostrar las medidas de tensión y corriente en (*p. u.*), o en Voltios y Amperios respectivamente.

Respecto a las tensiones del nudo hay dos posibilidades, la primera de ellas es que mida la tensión fase-tierra para lo cual el programa utiliza las siguientes ecuaciones.

$$V_{abc}(p. u.) = \frac{V_{fase-tierra}}{V_{base}} \quad (75)$$

$$V_{base} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{nominal}(V_{rms})}{\sqrt{3}} \quad (76)$$

La segunda posibilidad consiste en la medición de tensión fase-fase, donde ahora el programa se rige por las siguientes ecuaciones.

$$V_{abc}(p. u.) = \frac{V_{fase-fase}}{V_{base}} \quad (77)$$

$$V_{base} = \sqrt{2} \cdot V_{nominal}(V_{rms}) \quad (78)$$

En cuanto a las corrientes el programa medirá la corriente de línea en (*p. u.*) o en Amperios basándose en las siguientes expresiones.

$$V_{abc}(p.u.) = \frac{I_{abc}}{I_{base}} \quad (79)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}(VA)}{\frac{V_{nominal}(V_{rms})}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}} \quad (80)$$

Para configurar este módulo se debe abrir su cuadro de diálogo, donde habrá diversas posibilidades, en el caso de estudio se va a mostrar la configuración de cada uno de los nudos del sistema.

El nudo de 690V en el cual la medida de tensión será una medida fase-tierra se ha elegido la opción de mostrar los voltajes y corrientes en (*p.u.*), además se han tenido que introducir los valores de la potencia base y la tensión nominal del nudo, para finalizar la configuración de este módulo se quiere que las señales de salida sean en números complejos. Esta configuración se puede ver en la figura 39.

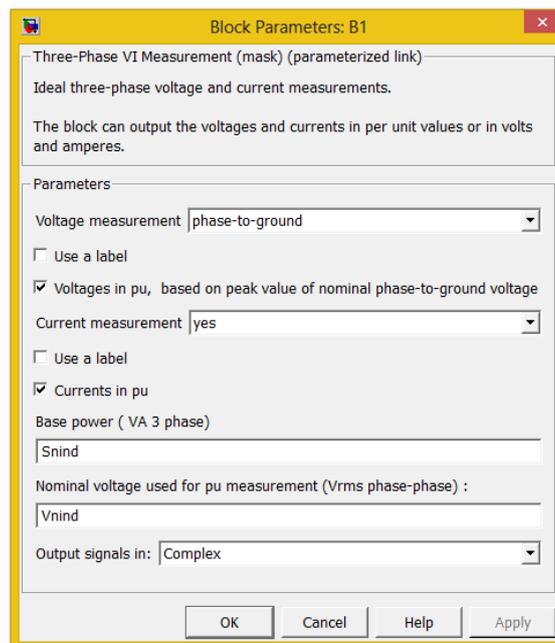


Figura 39.- Cuadro de diálogo con la configuración del nudo de 690V del modelo a simular.

Para finalizar con los módulos de los nudos del sistema se va a explicar la configuración elegida para el nudo de 20 kV. En este nudo se ha tomado la decisión de que entregue los valores de tensión fase-tierra y la corriente de línea en (*p.u.*). Utilizando la opción *use a label* del cuadro de diálogo se conseguirán cambiar las salidas de la máscara del módulo teniendo acceso a estas señales a partir del *Goto Tag*.

Para terminar la configuración de este módulo se introduce la potencia base en (*VA*) y la tensión nominal en voltios eficaces eligiendo la opción de las salidas del sistema en números complejos al igual que en el nudo de 690V.

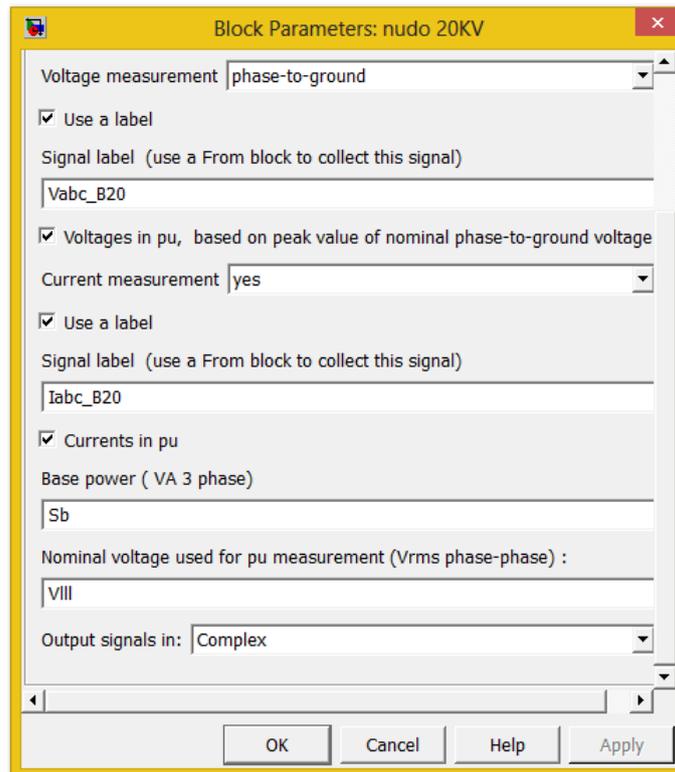


Figura 40.- Cuadro de diálogo con la configuración del nudo de 20KV del modelo a simular.

### 3.9. Módulo aerogenerador AE-61.

Para que el modelo no fuera tan denso y con tantos elementos se ha decidido utilizar este módulo con la máscara de un generador eólico de la figura 41.

Se ha introducido todo lo que equivale a la parte del generador eólico en este módulo, incluyendo desde la transformación de la energía del aire con las palas del aerogenerador que entrega el par electromagnético, la máquina de inducción con sus señales de salida, hasta el tramo de línea que corresponde al parque eólico, pasando por el nudo de 690V, por el transformador de 690V/20KV e incluyendo el banco de condensadores fijo conectado en paralelo entre este transformador y el nudo de 690V.

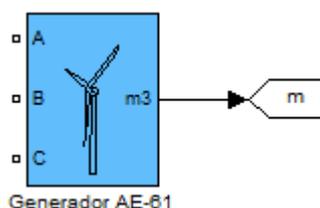


Figura 41.- Máscara del modelo del aerogenerador AE-61.

Se puede ver lo que hay dentro del módulo de la figura 41 en la figura 42.

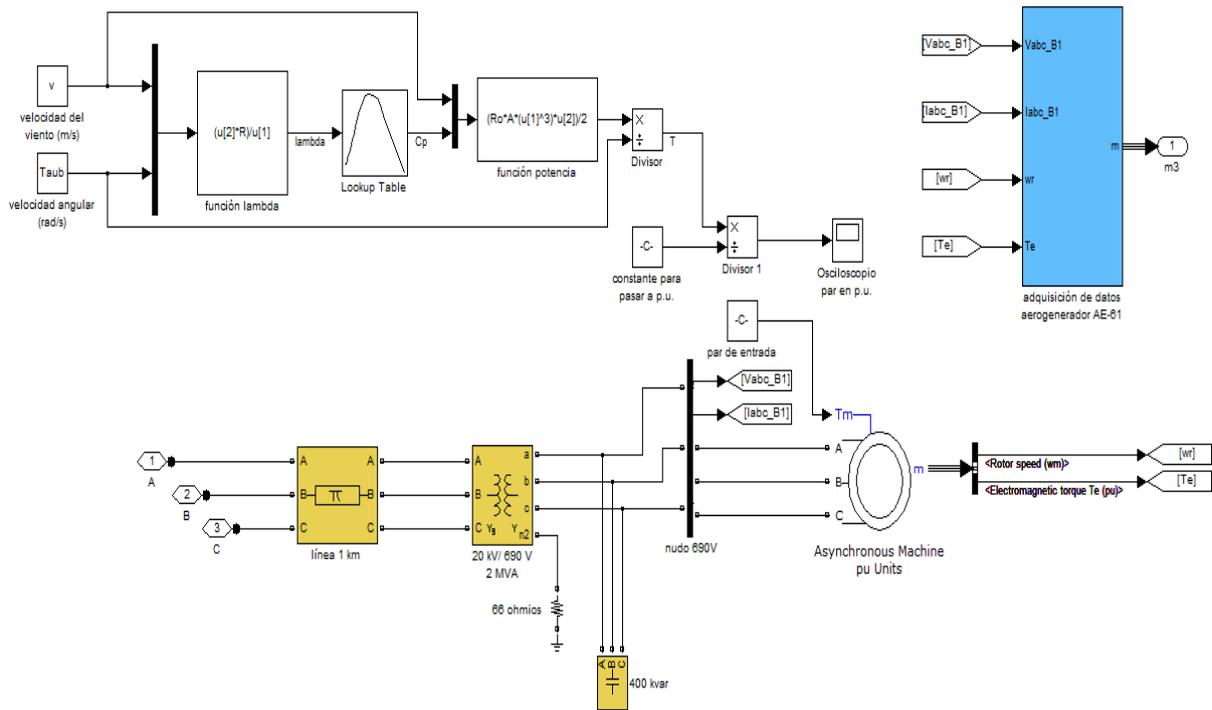


Figura 42.- Modelo bajo máscara del aerogenerador AE-61.

El objetivo del módulo del aerogenerador AE-61, es tener en la salida  $m$  de la figura 41 lo que interese para la realización de las simulaciones, para ello es necesario otro módulo llamado *Data Acquisition* que está colocado dentro del aerogenerador AE-61, donde tenemos 4 entradas que son proporcionadas a través de las salidas de la máquina de inducción:  $\omega_r$  y  $T_e$  y a través del nudo de 690V:  $V_{abc\_B1}$  e  $I_{abc\_B1}$ .

Si se mira dentro del módulo *Data Acquisition*, se verá la utilización de estas 4 señales de entrada para conseguir las 6 señales de salida que habrá en  $m$ . Las dos primeras salidas son las mismas que las dos entradas de tensión y corriente en valores complejos en el nudo de 690V, la tercera y cuarta salida se obtienen a partir de las dos primeras señales de entrada pasando estas dos señales de (*p.u.*) a valores de tensión y corriente mediante una ganancia multiplicando por la tensión y la corriente base.

Estas señales de tensión y corriente en unidades del sistema internacional, son en valores complejos, por lo que utilizando el módulo *3-Phase Active & Reactive power (Phasor Type)*, a través de las operaciones correspondientes podemos calcular la potencia en (*VA*) y separar esta potencia en su parte real y su parte imaginaria, siendo estas respectivamente la potencia activa y la potencia reactiva en unidades del sistema internacional, aunque por comodidad y porque son las típicas unidades que se utilizan para estos casos pasaremos la potencia activa y reactiva a (*MW*) y (*MVar*).

Por último están la quinta y sexta salida que se corresponden con las entradas de velocidad angular de la máquina de inducción y del par electromagnético de entrada en la máquina de inducción en (*p.u.*).

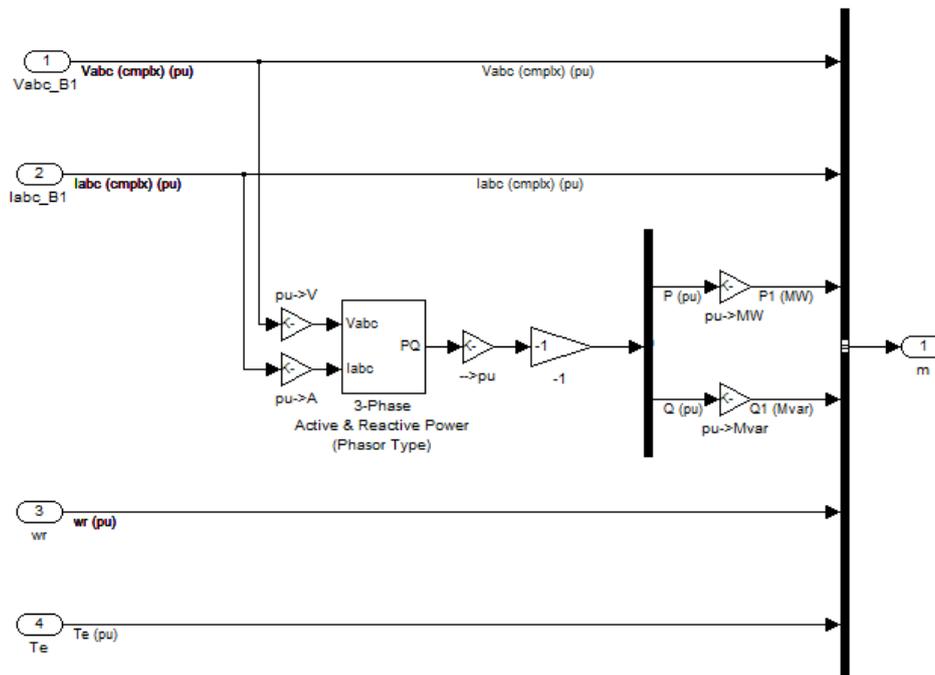


Figura 43.- Modelo bajo máscara Data Acquisition módulo aerogenerador AE-61.

Todas estas señales descritas anteriormente se juntan en un multiplexor que entrega una única salida  $m$  en el que se incluyen estas 6 señales, la salida  $m$  de la figura 43 es la que corresponde a la salida  $m$  del módulo del aerogenerador AE-61 de la figura 41.

### 3.10. Visualización de las señales a analizar del sistema.

Una vez explicado el módulo del generador AE-61, es necesario ver en el elemento *Scope* de *Simulink* la representación de las señales al realizar las simulaciones y para ello se utilizarán a parte del osciloscopio otros dos módulos *Data Acquisition*, de los cuales saldrán las señales hacia el osciloscopio, estos módulos los podemos ver en la figura 44.

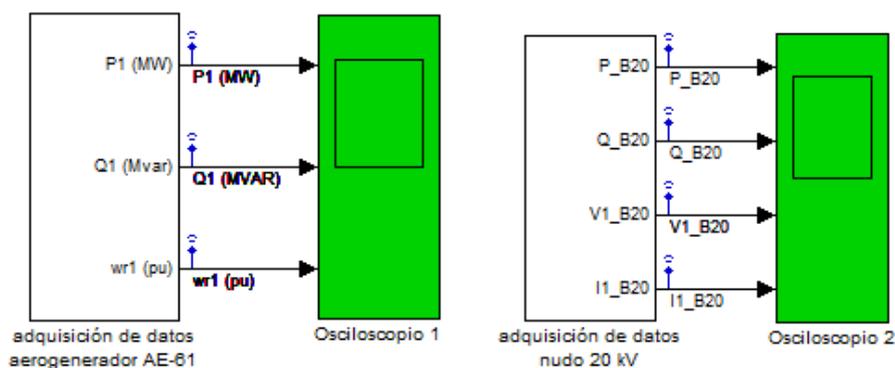


Figura 44.- Data Acquisition y Osciloscopios para visualización de las señales de sistema, aerogenerador y nudo 20KV.

Si se observa debajo de la máscara del módulo que entrega los datos de la máquina de inducción se podrá ver su configuración para que nos muestre el osciloscopio los datos correctos, figura 45.

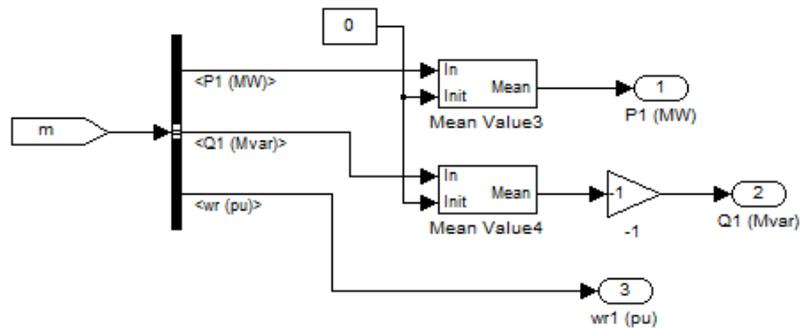


Figura 45.- Modelo bajo máscara Data Acquisition visualización parámetros del aerogenerador AE-61.

Como se observa en la figura 45, la señal de salida del módulo del aerogenerador AE-61 es la señal de entrada del módulo *Data Acquisition*, a partir de la cual se extraen las señales y se muestran en el osciloscopio. Las salidas que se necesitan representar son la potencia del aerogenerador AE-61 tanto activa como reactiva y la velocidad de la máquina de inducción.

El osciloscopio ha sido configurado para que tenga tres entradas y no tener un módulo *Scope* por cada señal que se vaya a representar, para configurar de esta manera el osciloscopio hay que abrir el módulo y en la barra de herramientas situarnos sobre el elemento *Parameters*, que se representa por este icono  y en la opción *Number of Axes* elegir el número de parámetros a representar, en el modelo a simular serán 3 y 4 respectivamente para representar las señales del aerogenerador y las del nudo de 20 kV, figura 46.

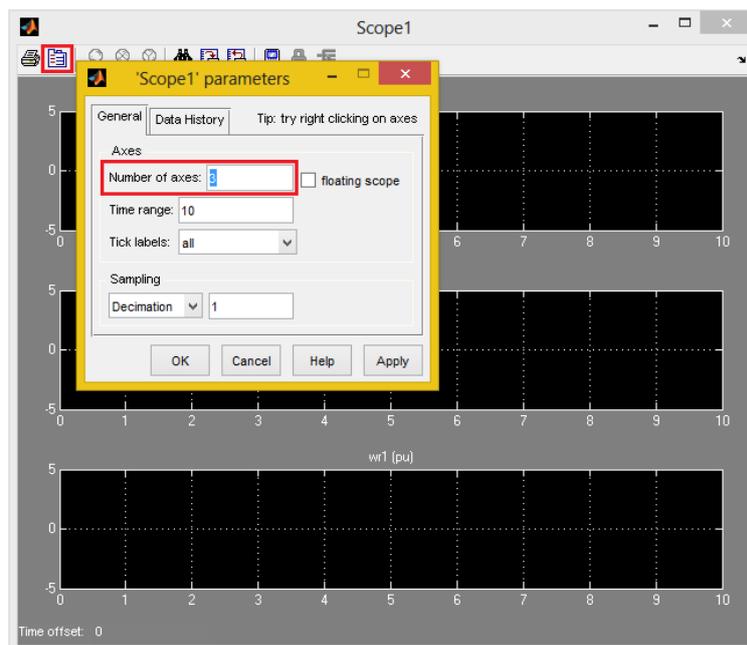


Figura 46.- Ruta y configuración osciloscopios.

Para representar las señales del segundo módulo *Data Acquisition*, es decir, las señales del nudo de 20 kV, se sigue el mismo procedimiento pero en este caso lo que habrá bajo la máscara del módulo será lo mostrado en la figura 47.

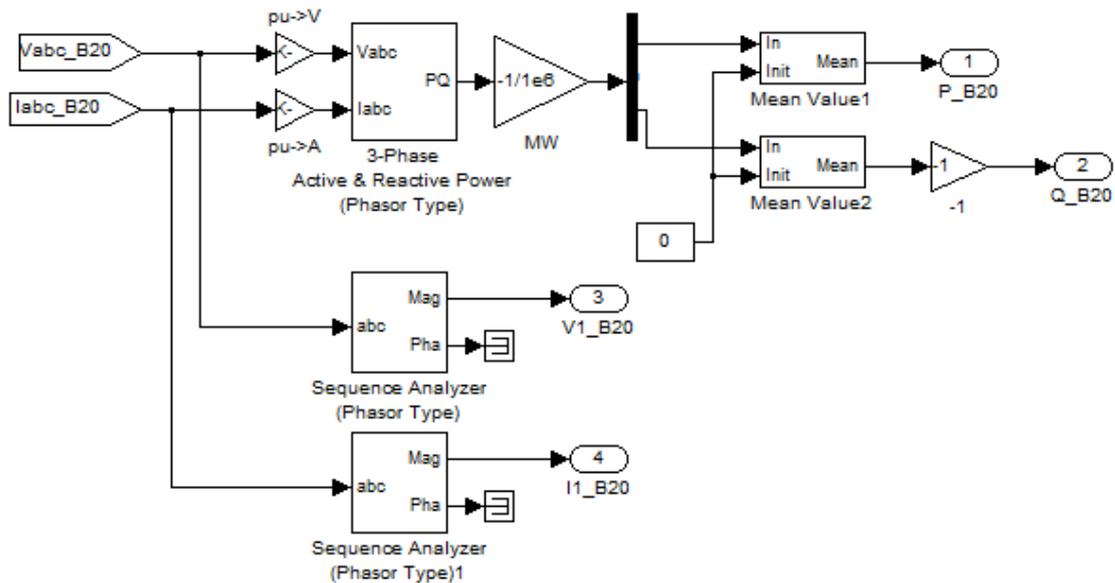


Figura 47.- Modelo bajo máscara Data Acquisition del nudo de 20KV.

### 3.11. Módulo de simulación de una falta.

El objetivo de las simulaciones es ver cómo se comporta el sistema ante una falta en la red, para ello se necesitará un elemento muy importante para este proceso, es decir, se utilizará un módulo que sea capaz de simular un cortocircuito en la red, este elemento se puede encontrar en *Elements*, dentro de *SimPowerSystem* con el nombre de *Three-Phase Fault* y que viene representado según la figura 48.

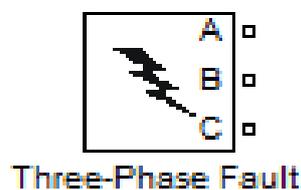


Figura 48.- Máscara del módulo de falta trifásica de Matlab.

Este módulo funciona conectando cada una de las fases de una línea con cada uno de los terminales A, B y C del módulo, de tal manera que durante el tiempo que sus interruptores estén cerrados está simulando un cortocircuito de las fases seleccionadas conectadas a tierra, con las resistencias de fase y la resistencia de tierra intercaladas entre las líneas y tierra tal y como se ve en la figura 49.

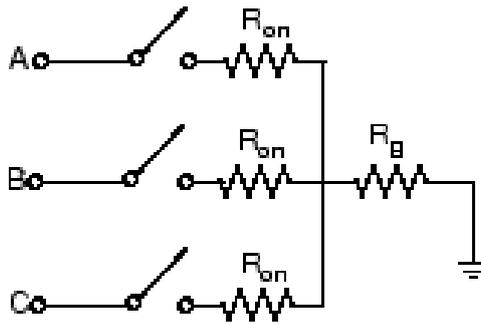


Figura 49.- Esquema del módulo de falta trifásica.

Para configurar este módulo, se deben seleccionar las fases en las que se produce la falta, donde en el modelo de estudio solo se han realizado faltas trifásicas teniendo que marcar por tanto cada una de las fases.

Después hay que darle valores a la resistencia de cada fase y a la resistencia de tierra y una vez configurados estos parámetros existen dos opciones: tener un control de tiempo de la falta externo o interno. En este caso se ha utilizado el control interno del módulo de falta trifásica.

A continuación se deben determinar los estados de la falta y el tiempo de cambio de estado, donde el 1 significa que la falta está activa y el 0 que no hay falta, estos estados necesitan llevar asociado un tiempo de falta que se introducirá en *Transition Times* del cuadro de diálogo del módulo, los cuales irán variando en las simulaciones.

Para finalizar este módulo, se tiene que introducir el valor de las resistencias de amortiguación de la falta y la capacitancia de amortiguación quedando finalmente la configuración de este módulo como se ve en la figura 50.

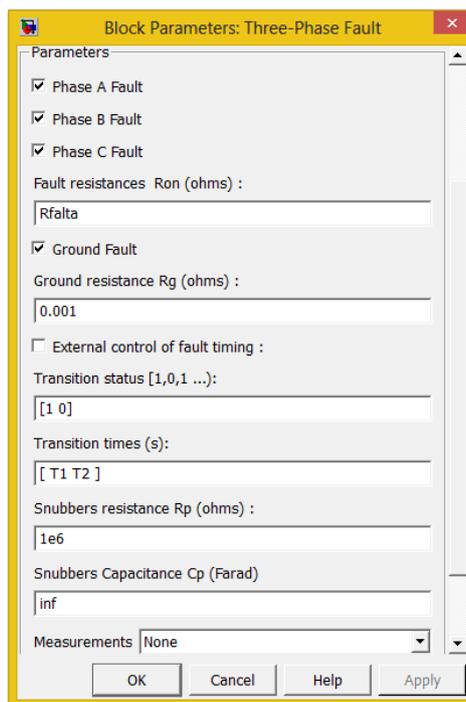


Figura 50.- Cuadro de diálogo del módulo de Falta trifásica de Matlab.

### 3.12. Modelo completo.

El modelo final sobre el que se trabajará queda por tanto como el de la figura 51, en el que se observan todos los elementos explicados en los puntos anteriores y además otro módulo adicional llamado *Powegui*, el cual será explicado en el apartado 4.1. de simulaciones, ya que es el módulo que permitirá la realización de estas en estado estacionario.

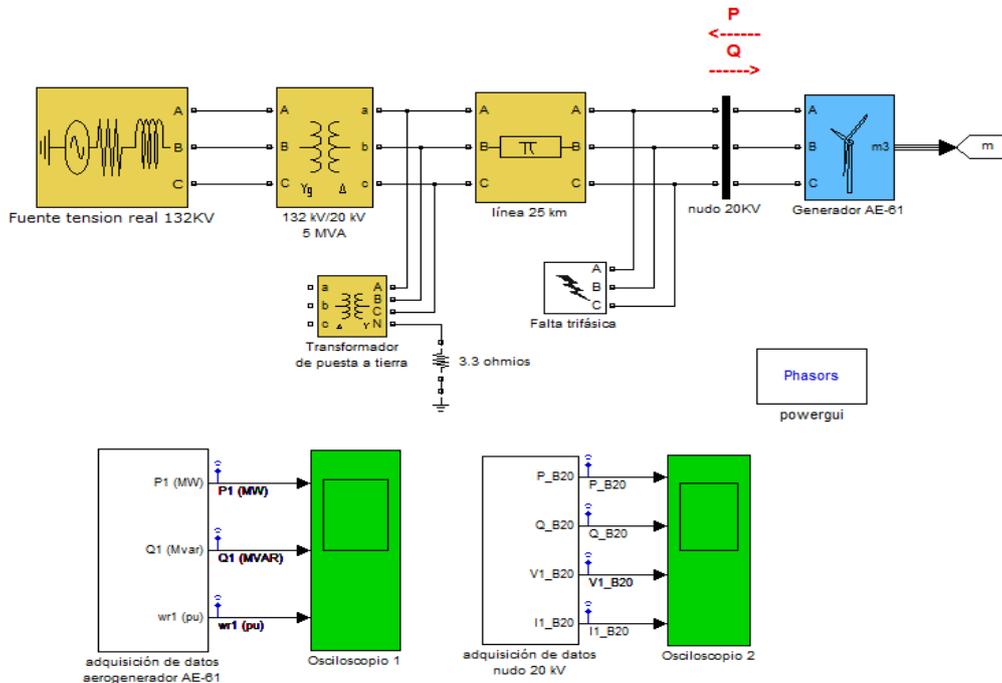


Figura 51.- Modelo completo a simular en Matlab sin compensadores.

### 3.13. Modelo completo con compensador estático SVC.

Este modelo, es igual que el modelo completo pero con tres elementos adicionales, el primero de los elementos y por el cuál se asigna el nombre a este modelo es el compensador estático SVC, el segundo elemento añadido al modelo es un módulo *Data Acquisition* para unir las señales de salida que tendrá este módulo a el tercer elemento que añadiremos, el osciloscopio y poder ver así el comportamiento del compensador estático SVC.

En primer lugar se verá cómo simula *Matlab* el comportamiento del SVC y las ecuaciones que utiliza para ello, además en la figura 52 observamos la máscara del módulo.

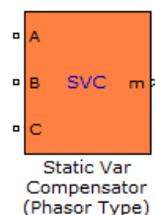


Figura 52.- Máscara del módulo del compensador estático SVC.

En la figura 53 se muestra el esquema del SVC incluyendo el sistema de control.

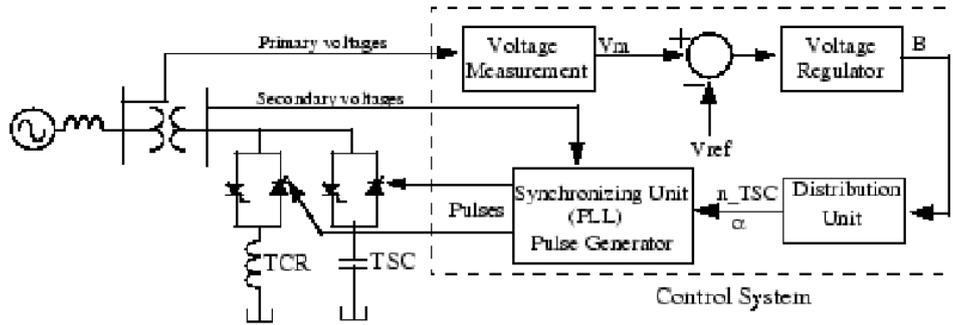


Figura 53.- Esquema del Módulo de Matlab SVC.

En esta figura 53 es posible diferenciar las partes que conforman el SVC, primero hay un voltímetro en la tensión primaria del transformador para ser comparada con la tensión de referencia y entregar la información al regulador, entonces este regulador indica la susceptancia  $B$  que es necesaria para estabilizar la tensión.

Después se encuentra la unidad de distribución  $TSC$  o  $TCR$  que es la encargada de calcular el ángulo de disparo  $\alpha$  de los tiristores y se lo comunica al siguiente módulo, es decir, al sistema de sincronización, en el cual se puede ver cómo le entra esta señal aunque también recibe la medida de tensión secundaria del transformador, encargándose el sistema de sincronización de enviar los pulsos necesarios a los semiconductores mediante un bucle de fase bloqueado ( $PLL$ ).

En la figura 54 se muestra la curva característica del compensador estático SVC.

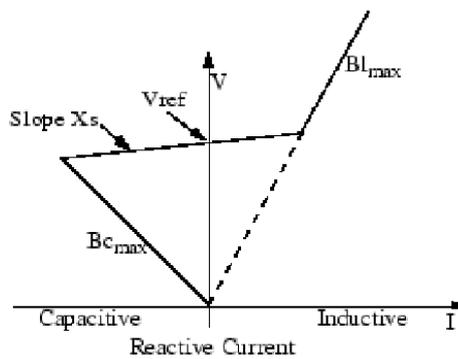


Figura 54.- Curva característica del SVC de Matlab.

El módulo se puede utilizar en dos modos de funcionamiento: en modo de regulación de tensión y en modo de control de energía reactiva, donde el modo de funcionamiento elegido será el de regulación de tensión.

El SVC va a operar en diferentes rangos, dependiendo de la tensión que haya en el punto de conexión del SVC y vienen determinados por las ecuaciones de la tabla 9.

<b>Primer rango</b>	$-Bc_{max} < B < Bl_{max}$	$V = V_{ref} + X_s \cdot I$
<b>Segundo rango</b>	$B = Bc_{max}$	$V = -\frac{I}{Bc_{m\acute{a}x}}$
<b>Tercer Rango</b>	$B = Bl_{max}$	$V = -\frac{I}{Bl_{m\acute{a}x}}$

Tabla 9.- Rangos de funcionamiento del módulo de compensador estático SVC en Matlab.

Dónde:

<b>V</b>	Tensión de la secuencia positiva ( <b>p. u.</b> )
<b>I</b>	Corriente reactiva ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )
<b>X<sub>s</sub></b>	Pendiente de reactancia ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )
<b>Bc<sub>max</sub></b>	Máxima susceptancia capacitiva ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )
<b>Bl<sub>max</sub></b>	Máxima susceptancia inductiva ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )
<b>P<sub>base</sub></b>	Potencia base

Tabla 10.- Parámetros de los rangos de funcionamiento del módulo de compensador estático SVC en Matlab.

La respuesta dinámica del SVC en modo de regulación de tensión dependerá de la ganancia proporcional e integral, de la pendiente de reactancia y de la potencia de cortocircuito del sistema.

Usando el modo de regulación de tensión la ganancia  $K_p = 0$  y si se retrasan el tiempo medida de tensión  $T_m$  y el tiempo de válvula  $T_d$ , el sistema se aproxima a uno de primer orden de la siguiente manera.

$$T_c = \frac{1}{K_i \cdot (X_s + X_n)} \quad (81)$$

Dónde:

<b>T<sub>c</sub></b>	Constante de tiempo en lazo cerrado
<b>K<sub>i</sub></b>	Ganancia integral de regulación de tensión $\left(\frac{B_{(p.u.)}}{(V/s)_{(p.u.)}}\right)$
<b>X<sub>s</sub></b>	Pendiente de reactancia ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )
<b>X<sub>n</sub></b>	Reactancia equivalente del sistema ( <b>p. u./P<sub>base</sub></b> )

Tabla 11.- Parámetros del sistema de control del módulo de compensador estático SVC en Matlab.

Para configurar este módulo se deberá abrir su cuadro de diálogo, figura 55, donde se ve la configuración utilizada para simular el compensador estático SVC.

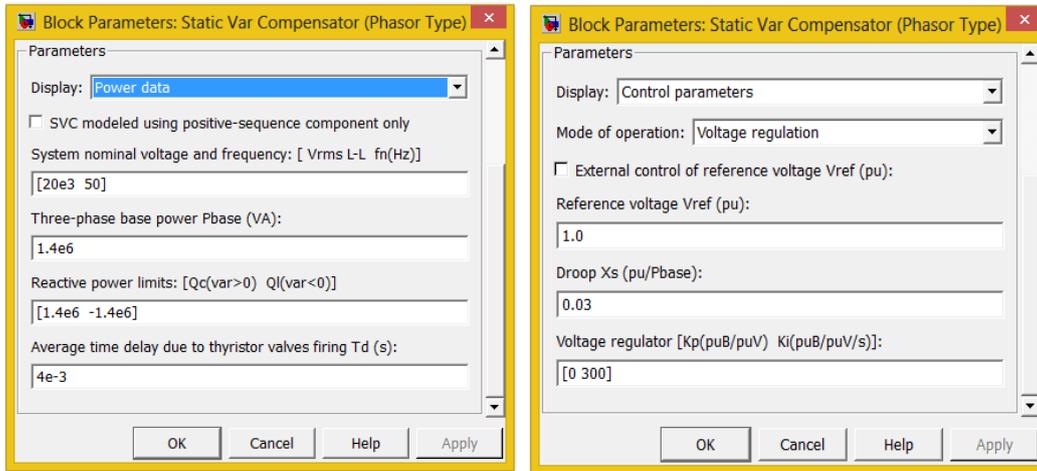


Figura 55.- Cuadro de diálogo del Módulo SVC de Matlab y los parámetros de este módulo utilizados en el modelo.

El módulo *Data Acquisition* de la figura 56 tiene dos salidas, la primera es la de tensión y la segunda es la potencia reactiva que inyecta o consume, en la figura 57 se observa lo que hay dentro de este módulo.

En cuanto al osciloscopio, se debe configurar del mismo modo que en el apartado 3.10. pero con la diferencia de que ahora solo se utilizan dos entradas al mismo.

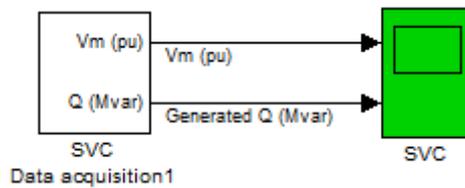


Figura 56.- Data Acquisition y osciloscopio para Mostrar las señales del SVC.

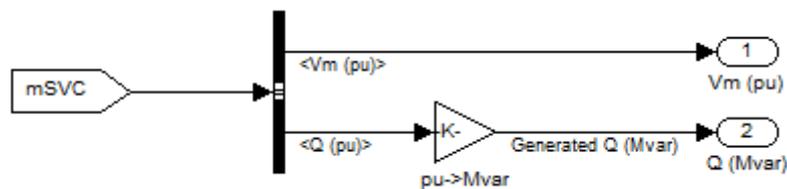


Figura 57.- Modelo bajo máscara data acquisition SVC.

Con todo esto se ha creado un nuevo modelo para realizar las simulaciones con un compensador estático de potencia reactiva.

Este nuevo modelo, finalmente quedará como el de la figura 58.

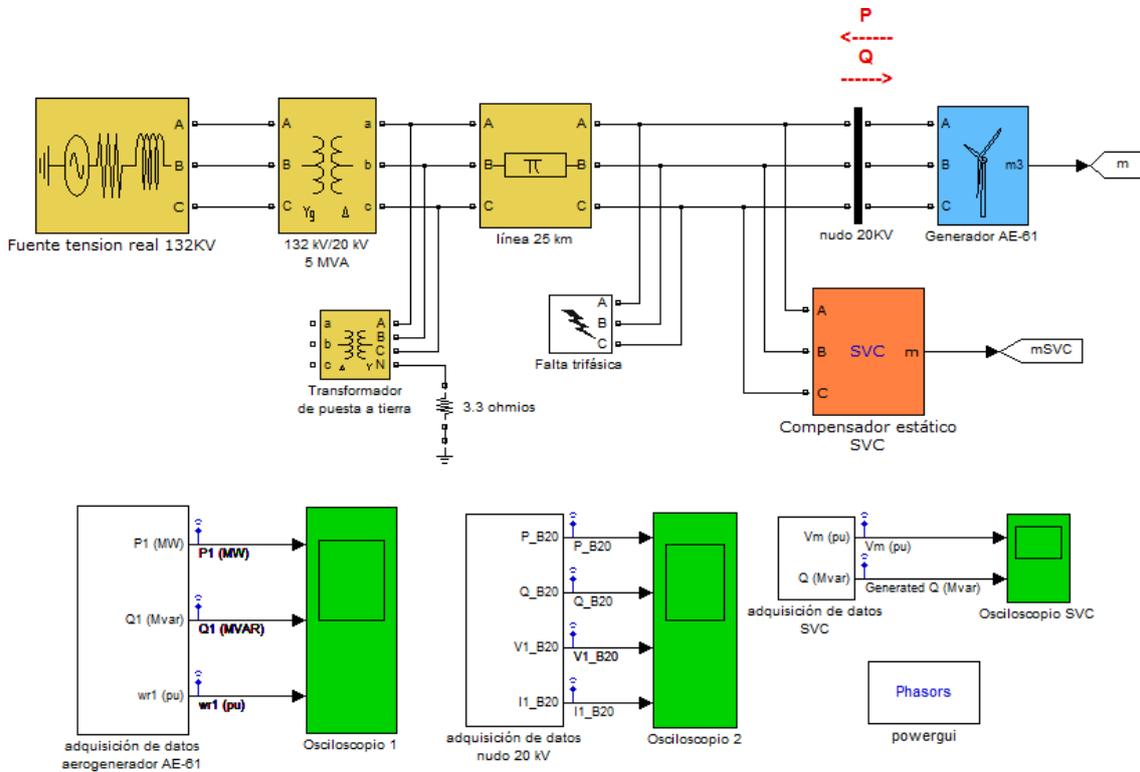


Figura 58.- Modelo completo a simular en Matlab con SVC.

### 3.14. Modelo completo con compensador estático STATCOM.

En el último modelo que se simulará, se cambiará únicamente el SVC por el módulo que simula un STATCOM, el cual podemos ver en la figura 59.

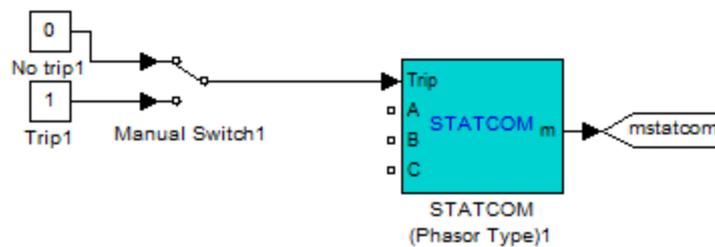


Figura 59.- Máscara del módulo del compensador estático STATCOM.

Los elementos adicionales respecto al modelo completo son los mismos que en el modelo con SVC, pero con un nombre diferente para la señal de salida del STATCOM y un nombre diferente para la entrada del módulo *Data Acquisition*, que debe corresponder con la salida del STATCOM quedando el sistema como aparece en las figuras 60 y 61.

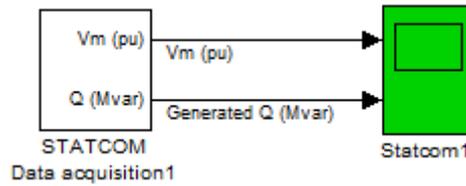


Figura 60.- Data acquisition y osciloscopio para mostrar las señales del STATCOM.

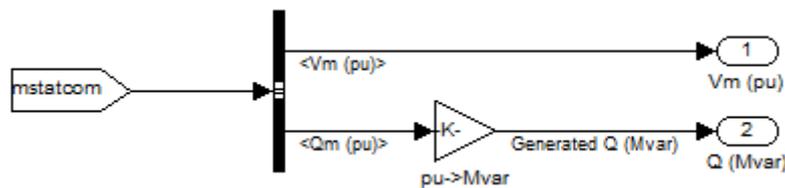


Figura 61.- Modelo bajo máscara data acquisition STATCOM.

Una vez vistos los cambios realizados en el modelo, se seguirá con la explicación de cómo simula *Matlab* el módulo del STATCOM.

Este dispositivo se basa en el uso de semiconductores para controlar la inyección o consumo de potencia reactiva, inyectando potencia reactiva cuando la tensión es menor que la tensión de referencia y consumiendo potencia reactiva cuando la tensión es mayor que la de referencia.

Para determinar si se consume o genera potencia reactiva se utilizan elementos de electrónica de potencia como GTO's, IGBT's o IGCT's donde estos son los denominados semiconductores.

Normalmente estos dispositivos se controlan a través de la modulación PWM y pueden entregar más potencia reactiva aunque la tensión sea muy pequeña a diferencia de los SVC, teniendo como única limitación la temperatura de los semiconductores.

Es posible ver el funcionamiento simple de este módulo en la figura 62, que se basa en la variación de potencia reactiva a través del control de tensión VSC conectado en el devanado secundario del transformador de acoplamiento, que transforma la señal de alterna a continua y la compara.

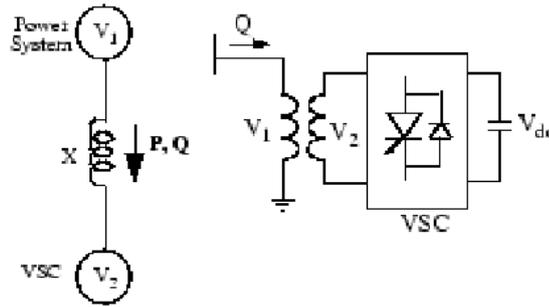


Figura 62.- Esquema simplificado de transferencia de potencia y funcionamiento del STATCOM.

El flujo de potencia reactiva entre dos fuentes de tensión de un sistema conectado a través de una línea con una inductancia, viene determinado por las siguientes ecuaciones.

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \sin \delta}{X} \quad (82)$$

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cdot \cos \delta)}{X} \quad (83)$$

$V_1$	Tensión de línea 1
$V_2$	Tensión de línea 2
$X$	Reactancia de línea o de interconexión
$\delta$	Ángulo de $V_1$ respecto de $V_2$

Tabla 12.- Parámetros para el cálculo de transferencia de potencia en el módulo de Matlab STATCOM.

El diagrama de control del compensador estático STATCOM, viene determinado en la figura 63.

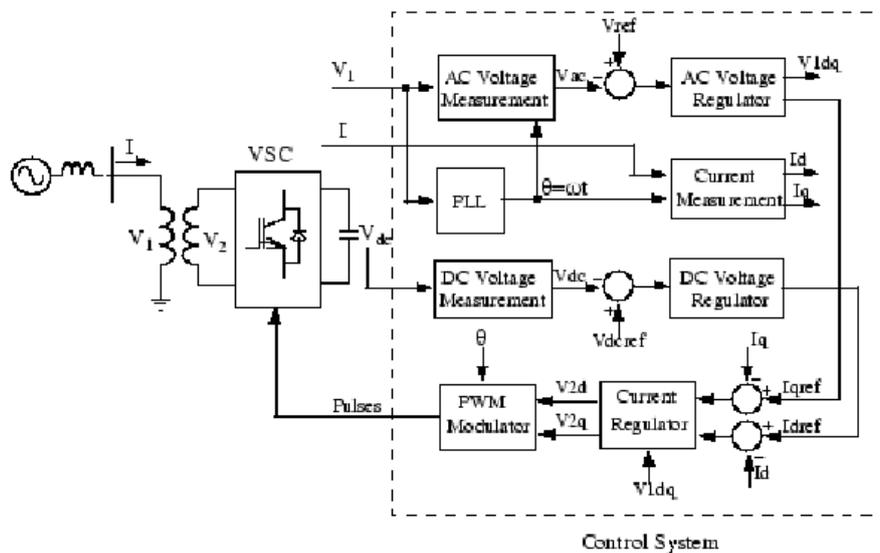


Figura 63.- Esquema y Sistema de control del compensador estático STATCOM.

El sistema de control consta de un bucle de enganche de fase (PLL), que sincroniza las tres tensiones primarias de secuencia directa  $V_1$  del transformador, esta salida del (PLL) se utiliza para el cálculo de los ejes d y q, tanto de tensión como de corriente y además consta de dispositivos para medir las magnitudes de las componentes de los nuevos ejes d y q, a parte de la tensión en la parte de corriente continua.

Además en la parte de control hay un bucle que regula la tensión alterna y otro que regula la tensión continua, donde la salida del regulador de tensión alterna es la  $I_{qref}$  y la salida del regulador de tensión continua es la  $I_{dref}$ , que serán comparadas con las corrientes  $I_q$  e  $I_d$  respectivamente, para que esta comparación de señales en el regulador de corriente que controla tanto la magnitud como la fase de la tensión le indique a los semiconductores cuando deben activarse y desactivarse de la forma más precisa posible.

En la figura 64 se observa la curva característica del STATCOM que a diferencia del SVC, cuando trabaja en la zona capacitiva y la tensión es muy baja debido a un cortocircuito o a cualquier otro motivo, no ve mermada su capacidad de entregar potencia reactiva en el punto de conexión del STATCOM.

Esta curva característica se rige por la ecuación (84), donde la pendiente de variación de la reactancia normalmente está comprendida entre el 1% y el 4%.

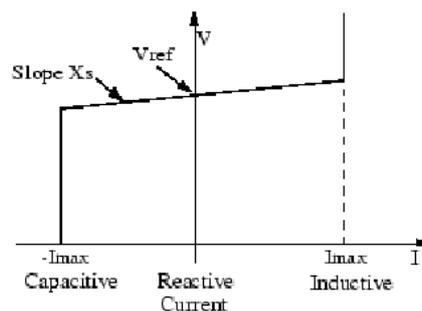


Figura 64.- Curva característica del STATCOM de Matlab.

$$V = V_{ref} + X_s \cdot I \quad (84)$$

$V$	Voltaje de secuencia directa (p. u.)
$I$	Corriente reactiva $(p. u. / P_{nom})$ si $I > 0$ la corriente es inductiva
$X_s$	Pendiente de reactancia $(p. u. / P_{nom})$
$P_{nom}$	Potencia nominal trifásica especificada en el cuadro de dialogo del bloque

Tabla 13.- Parámetros para referencias la tensión en el módulo de Matlab STATCOM.

Con todo esto se muestra la configuración y los valores utilizados en el STATCOM en la figura 65. El parámetro más importante en los compensadores estáticos es la capacidad de entregar potencia reactiva ya que será lo que determine principalmente lo que pueden ayudar

estos dispositivos a estabilizar la tensión, aunque los demás parámetros también son muy importantes.

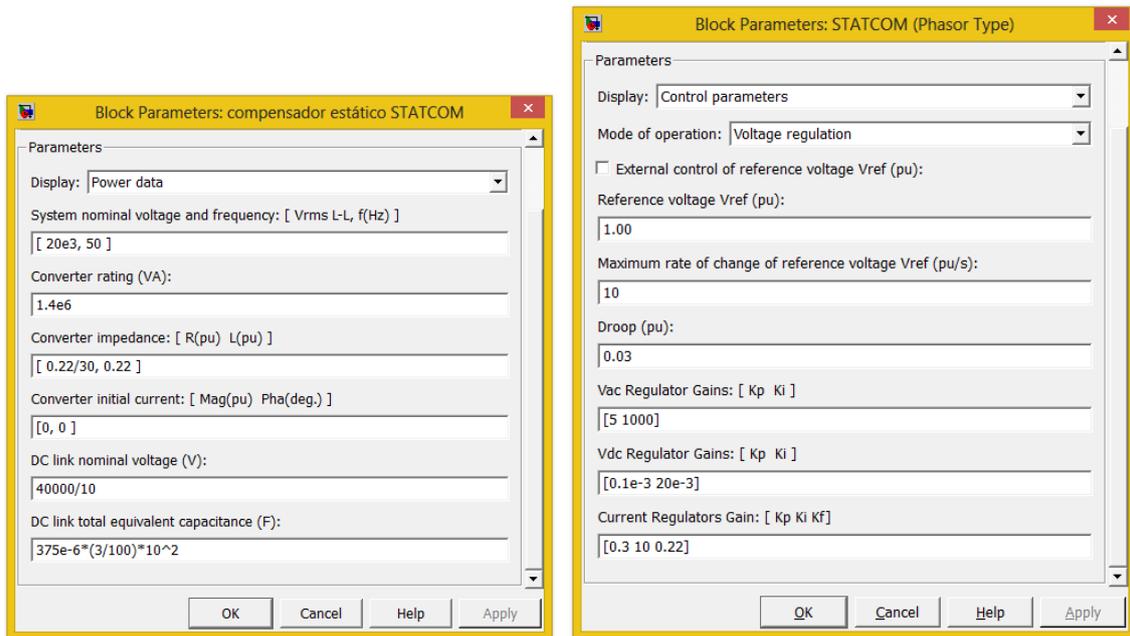


Figura 65.- Cuadro de diálogo del Módulo STATCOM de Matlab y los parámetros de este módulo utilizados en el modelo.

Una vez determinado cómo funciona el compensador estático STATCOM en *Matlab*, el modelo final sobre el que se realizarán las simulaciones será el de la figura 66.

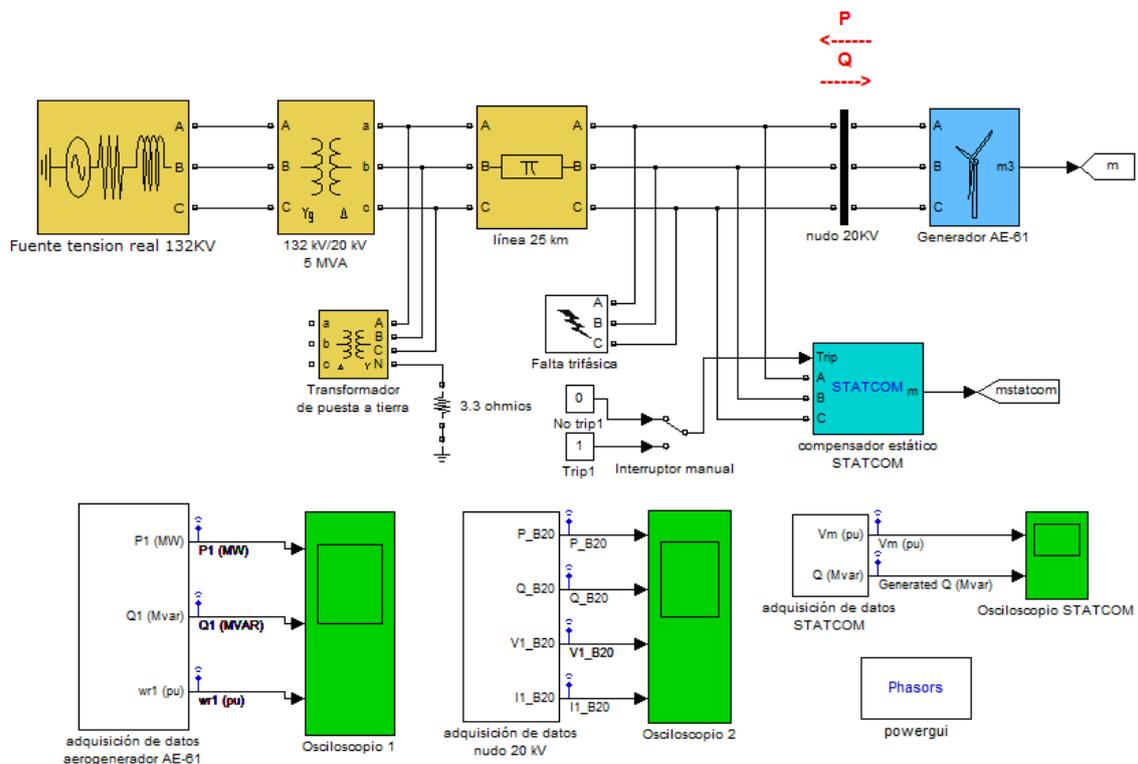


Figura 66.- Modelo completo a simular en Matlab con STATCOM.

### 3.15. Parámetros del sistema.

Una vez realizados y completados los modelos a partir de los cuales se simulará, para que funcionen se tiene que determinar el valor de todos los parámetros en los módulos explicados desde el apartado 3.1. hasta el apartado 3.8.

Para realizar esta acción se ha decidido utilizar el apoyo del editor de *Matlab*, en el cual se ha creado una nueva hoja llamada parámetros, donde se han distinguido con nombres los parámetros de cada elemento del sistema y se le han asignado los valores correspondientes a cada parámetro.

En los modelos con compensadores estáticos, ya que los parámetros de estos compensadores SVC y STATCOM son constantes y debido a que se deberían crear dos hojas adicionales con el editor de *Matlab*, se ha tomado la decisión de incluir directamente los datos en cada uno de los cuadros de diálogo de estos dos módulos como se dijo en los apartados 3.13. y 3.14.

El uso de las hojas del editor de *Matlab* para realizar la simulaciones es de gran utilidad, debido a que en las simulaciones se tendrán que estar variando varios parámetros continuamente como los tiempos de los estados de falta, la resistencia de falta por cada fase, la velocidad con la que incide el viento en el aerogenerador y la potencia de cortocircuito de la red.

Si no se creara esta hoja en el editor de *Matlab* se tendrían que cambiar todos estos parámetros abriendo cada uno de los módulos por separado y aumentando de forma muy considerable el tiempo empleado en las simulaciones.

Para crear una hoja en el editor de *Matlab*, solo es necesario hacer clic en el icono  y empezar a escribir el código de forma correcta, siguiendo las reglas para no producir ningún tipo de error a la hora de poner en funcionamiento todos los parámetros.

Una vez redactado el código y antes de realizar las simulaciones se necesita pulsar sobre el icono  para que todos estos parámetros aparezcan en el espacio de trabajo de *Matlab*.

También se han realizado anotaciones de texto en los parámetros explicando que parámetro es cada uno y a que módulo pertenecen.

Todo lo visto en este apartado está reflejado en las figuras 67 y 68, donde los valores que hay en las figuras han sido los utilizados en todos los elementos.

```

% PARAMETROS A VARIAR
T1=3.5; %Tiempo de inicio de falta (s)
T2=5.31; %Tiempo de fin de falta (s)
Rfalta=5.13; %Resistencia por fase de falta (ohmios)
v=14.34; %Velocidad del viento (m/s)
Scc=150e6; %Potencia de cortocircuito (VA)

% VARIABLES DEL SISTEMA
fn=50; %Frecuencia nominal del sistema (Hz)
Sb=5e6; %Potencia base del sistema (VA)
Vllred=132e3; %Tensión de red (V)
Phred=0; %Fase de red (grados)
Vlll=20e3; %Tensión intermedia (V)
Init=[1 0 0 0 0 0 0 0]; %parametros iniciales de la máquina de inducción

% PARAMETROS AEROGENERADOR
Taub=1.969; %Velocidad rápida del aerogenerador (rad/s)
pi=3.1415;
Ro=1.225; %Densidad del aire (Kg/m^3)
A=2922.47; %Area de barrido de las palas (m^2)
R=30.5; %Radio de las palas (m)

lambda=[2.4 2.5 2.61 2.73 2.86 3 3.16 3.33 ...
        3.53 3.75 4 4.28 4.61 5 5.46 6 6.67 7.5 ...
        8.57 9.98 13.308]; %Vector lambda
cp=[0.043870127 0.049625969 0.056568095 0.064952662 ...
    0.075826629 0.088965945 0.105557368 0.126540533 ...
    0.152371025 0.184127296 0.220482845 0.261004667 ...
    0.305137473 0.350776391 0.394542828 0.429606353 ...
    0.446005087 0.440814386 0.413698506 0.27059893 0]; %Vector Cp

% TRAFO 1
Snt1=5e6; %Potencia nominal transformador 1
%Resistencias e inductancia transformador 1
Rmt1=500;
Lmt1=500;
R1t1=0.08/30;
L1t1=0.08;
R2t1=0.08/30;
L2t1=0.08;

% TRAFO DE PUESTA A TIERRA
Sntt=5e6; %Potencia nominal transformador de puesta a tierra
%Resistencias e inductancia transformador de puesta a tierra
Rmtt=500;
Lmtt=500;
R1tt=4.7/(20e3^2/5e6)/30;
L1tt=4.7/(20e3^2/5e6);
R2tt=1e-6;
L2tt=0;

```

Figura 67.- Primera parte de los parámetros de la hoja creada por el editor de Matlab “parámetros”.

```

% TRAF0 2
Snt2=2e6; %Potencia nominal transformador 2
%Resistencias e inductancia transformador 2
Rmt2=500;
Lmt2=inf;
R1t2=0.025/30;
L1t2=0.025;
R2t2=0.025/30;
L2t2=0.025;

% LINEA 1
%Resistencias, inductancias y capacitancias secuencia directa y homopolar
R111=0.1153;
R011=0.413;
L111=1.05e-3;
L011=3.32e-3;
C111=11.33e-009;
C011=5.01e-009;
l1=25; %Longitud línea 1 (km)

% LINEA 2
%Resistencias, inductancias y capacitancias secuencia directa y homopolar
R112=0.1153;
R012=0.413;
L112=1.05e-3;
L012=3.32e-3;
C112=11.33e-009;
C012=5.01e-009;
l2=1; %Longitud línea 2 (km)

% BANCO DE CONDENSADORES
Qc=400e3; % (Var)

% GENERADOR ASÍNCRONO DE INDUCCIÓN CON ROTOR EN JAULA DE ARDILLA
Snind=1.4e6;
Vnind=690;
Rsind=0.004843;
Lsind=0.1248;
Rrprima=0.004377;
Lrprima=0.1791;
Lmut=6.77;
Kinerc=5.04;
Kfricc=0.01;
Pp=3;

```

Figura 68.- Segunda parte de los parámetros de la hoja creada por el editor de Matlab "parámetros".

## 4. SIMULACIONES.

### 4.1. *Módulo powergui.*

En este apartado se verá el procedimiento para la realización de las simulaciones, donde lo primero que se debe saber es que la realización de las simulaciones se va a realizar en régimen permanente y no en régimen transitorio.

En primer lugar, una vez terminados los modelos e introducidos todos los parámetros del generador eólico, de la máquina de inducción y de todos los elementos de la red es necesario indicarle al programa el estado inicial de partida para que se realicen los cálculos en régimen permanente. Para realizar este paso es necesario abrir el módulo *powergui* que se encuentra en cada uno de los tres modelos a simular y una vez abierto se explicará paso a paso como se debe proceder para realizar este proceso.

- En la ventana del módulo *powergui* hay diferentes opciones, donde se comenzará por los estados en régimen permanente de tensiones y corrientes. Para esto se hace doble clic sobre la opción recuadrada en rojo en la figura 69 abriéndose la ventana que aparece a la derecha en la misma figura. Ahora hay que introducir el valor de la frecuencia de 50Hz utilizada en la pestaña *Frequency* y ajustar estos valores pulsando el botón *Update Steady State Values*, que actualizará estos valores a unos correctos con todos los parámetros que hay en el modelo a simular.

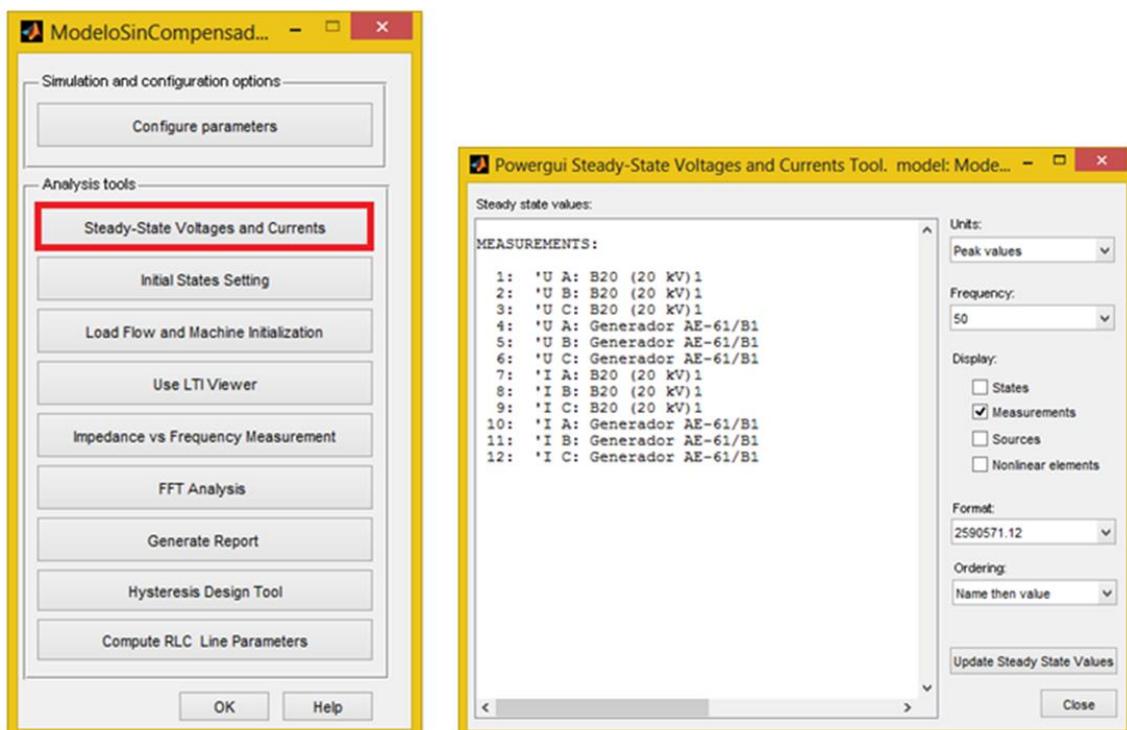


Figura 69.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Steady-State Voltages and Currents

- En este procedimiento se hará doble clic sobre el módulo *powergui* y se pulsará el botón recuadrado en la figura 70 abriéndose así la ventana derecha de la misma figura. Una vez abierta esta pestaña se van a marcar las opciones *To Steady State* y *best of* para partir del mejor estado estacionario posible calculado por el programa. Una vez realizadas estas acciones, se pulsará el botón *OK* para confirmarlo.

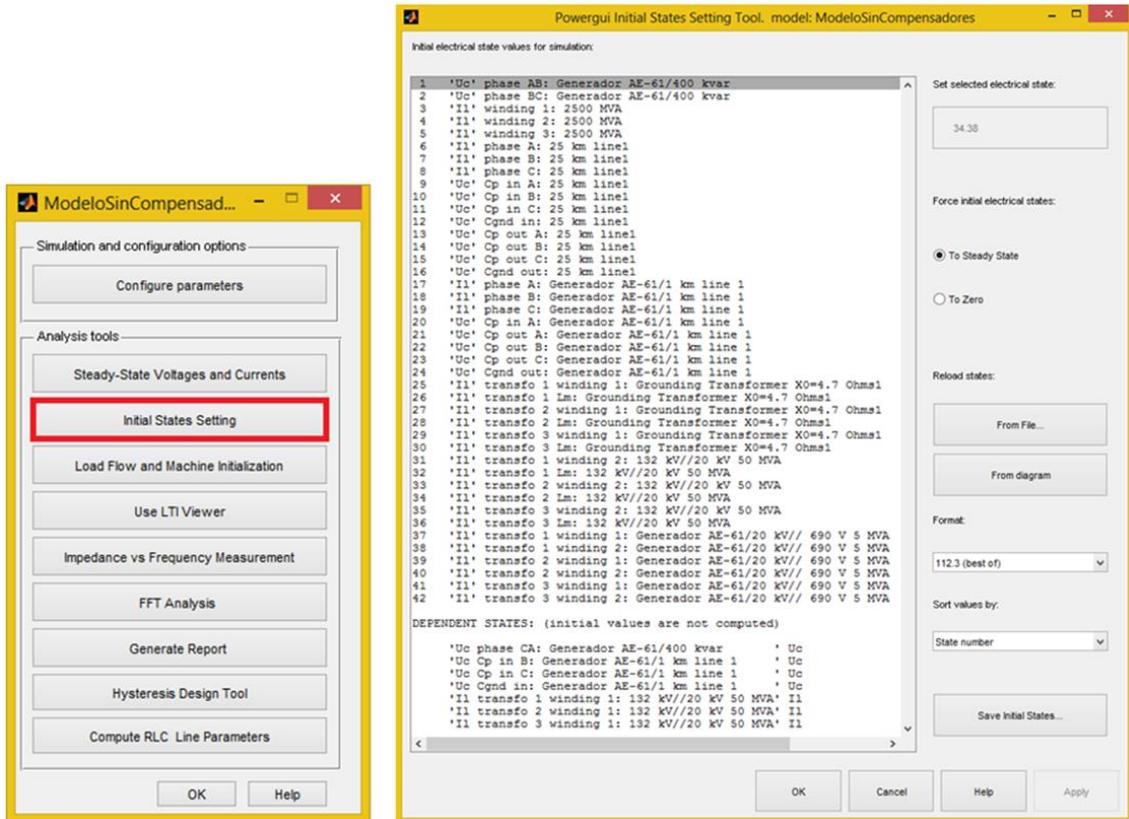


Figura 70.- Cuadro de dialogo del módulo *powergui* e *Initial States Setting*

- Para correr el flujo de cargas y la inicialización de la máquina en la ventana *powergui* se pulsa el botón *Load Flow and Machine Initialization*, abriendo así la ventana correspondiente a la derecha de la figura 71, donde es necesario que cambiemos en la pestaña *Load Flow Frequency* la frecuencia impuesta por defecto en *Matlab* de 60Hz a 50Hz. Después se indicará la potencia mecánica del aerogenerador en la pestaña *Mechanical power* sabiendo que esta potencia debe ser negativa debido al funcionamiento como generador. El siguiente paso será pulsar los botones *Update Circuit & Measurements* y *Update Load Flow* respectivamente para correr el flujo de carga y actualizar los parámetros del circuito, donde se verán los parámetros actualizados en la figura 71. Por último, una vez conocido el par a introducir en la máquina, mediante un proceso iterativo en el aerogenerador se conseguirá la velocidad necesaria para entregar el par correspondiente a la generación de la potencia especificada en este módulo.

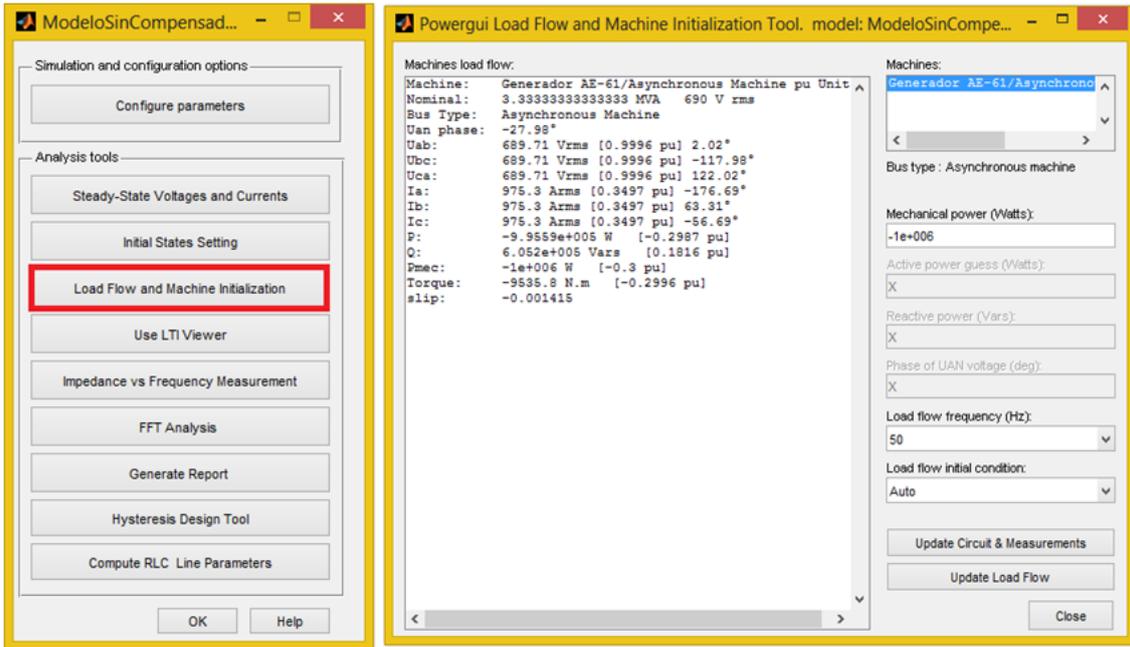


Figura 71.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Load Flow and Machine Initialization

- Si ahora se hace clic sobre el botón *Use LTI Viewer* del cuadro de diálogo del módulo *powergui* que aparece en la figura 72, se verían las entradas y salidas del sistema en la parte derecha de la misma figura.

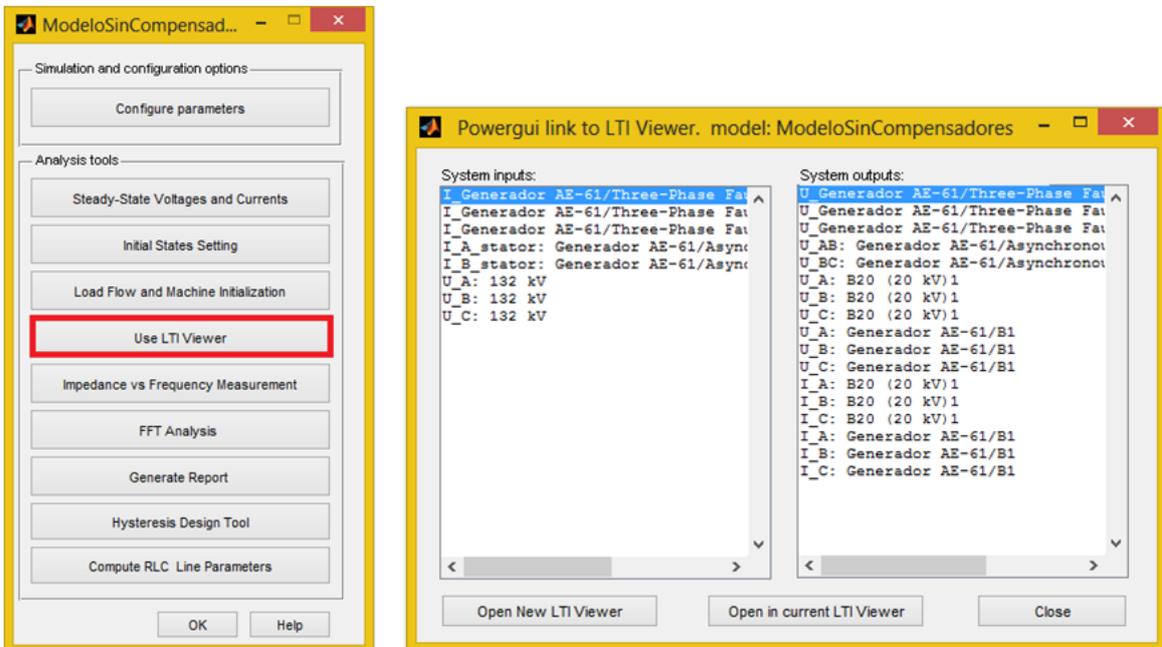


Figura 72.- Cuadro de dialogo del módulo powergui y Use LTI Viewer

- En el botón *Impedance vs Frequency Measurement* del cuadro de diálogo del módulo *powergui* se vería la medida de la impedancia frente a la frecuencia, aunque no se hará uso de este botón del cuadro de diálogo.

- El botón *Generate Report* del módulo *powergui* entregará los datos del informe del cálculo realizado por *Matlab*, donde hay que tener marcada la opción *Steady State* y la frecuencia de 50Hz tal como aparece en la figura73.

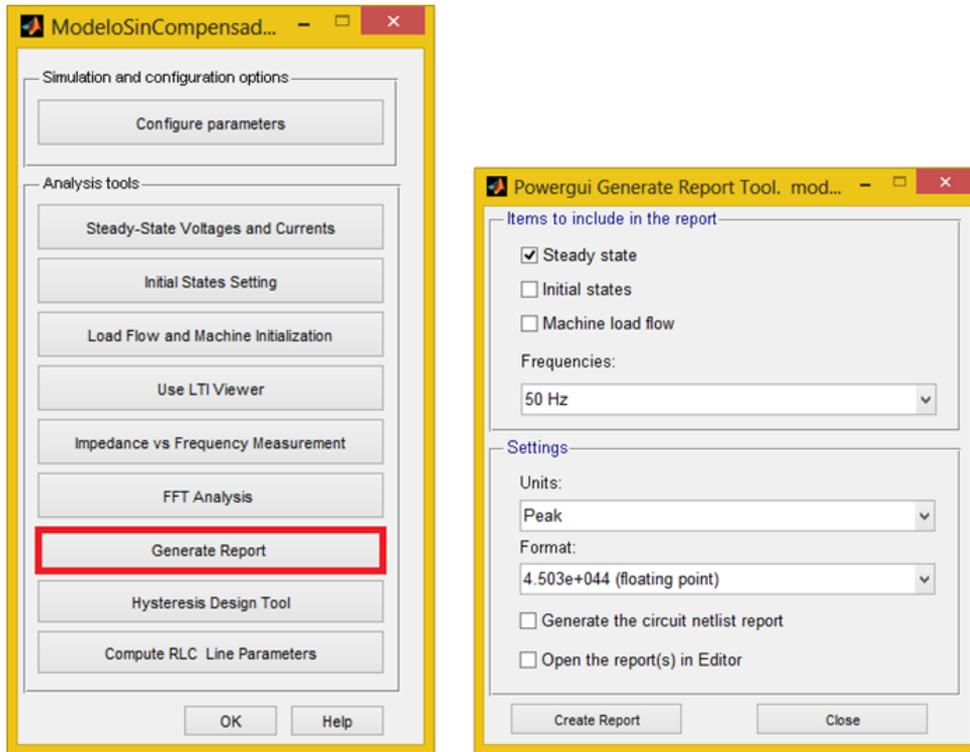


Figura 73.- Cuadro de dialogo del módulo *powergui* y *Generate Report*

- En *Hysteresis Design Tool* dentro del módulo *powergui*, se encontrarán los parámetros de diseño de la máquina de inducción y la curva de histéresis de la misma.

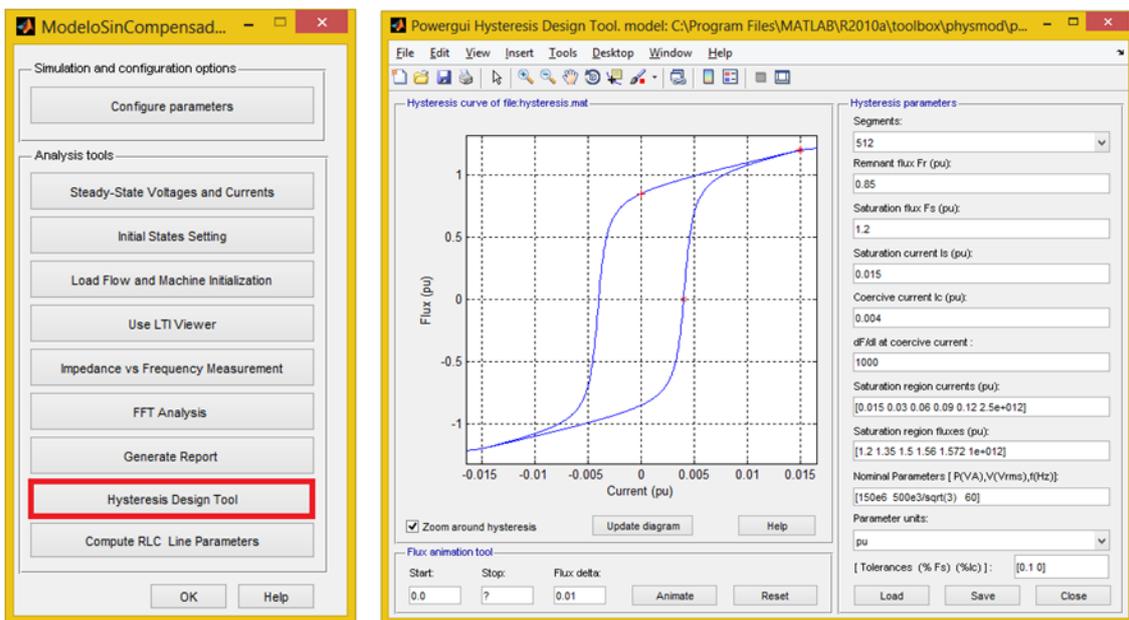


Figura 74.- Cuadro de dialogo del módulo *powergui* y *Hysteresis Design Tool*

- Como penúltimo botón que habrá dentro del módulo de *powergui* estará *Compute RLC Line Parameters*, que muestra los parámetros de las líneas en las cuales tenemos que hacer el cambio de frecuencia a 50Hz.

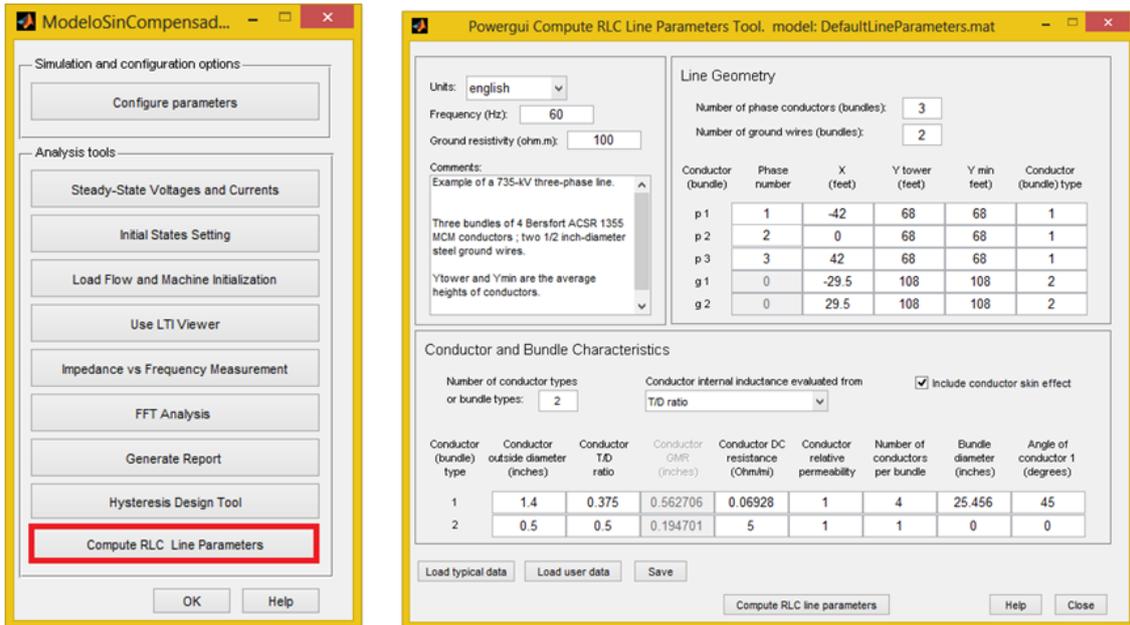


Figura 75.- Cuadro de dialogo del módulo *powergui* y *Compute RLC Line Parameters*

- Por último, en *Configure Parameters* en la parte superior del cuadro de diálogo del módulo *powergui*, se indicará que se está trabajando con fasores y la frecuencia del sistema de 50 Hz.

## 4.2. Simulaciones modelo sin compensadores.

El objetivo de estas simulaciones, es el cumplimiento del procedimiento de operación 12.3, que recibe el nombre de “Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas”, para ello se estudiarán los aspectos más relevantes cuando hay un hueco de tensión debido a un cortocircuito trifásico en el punto de conexión del parque eólico y la red. Estos aspectos son: la duración del cortocircuito, la profundidad del hueco de tensión, la potencia de cortocircuito de la red, la potencia reactiva y la potencia a la que opera el aerogenerador AE-61.

La secuencia para la realización de las simulaciones, consta de los siguientes pasos:

- 1) En primer lugar, se deberá elegir una potencia de cortocircuito de red y la potencia que producirá el aerogenerador.
- 2) Después, se introducirá la potencia producida por el aerogenerador en el cuadro de diálogo del módulo *powergui* de la figura 71. Una vez indicada la potencia, el programa mostrará el par necesario que debe entrar en la máquina de inducción. Conocido el par que se debe aplicar, a través de un proceso iterativo se obtendrá la velocidad del viento necesaria que tiene que incidir sobre el aerogenerador AE-61, como ya vimos en el apartado 4.1.
- 3) Tras el segundo paso, se empezará a simular variando la resistencia de falta de las fases para forzar el límite mínimo de 0,2 (*p.u.*) al que puede llegar nuestra tensión en el nudo de 20 kV determinado en el procedimiento de operación 12.3, sin tener en cuenta todavía la duración del cortocircuito.
- 4) Una vez conocida esta resistencia, se determinará la duración máxima que puede tener el cortocircuito sin que la máquina entre en zona inestable y no pare de acelerarse. Además, se verá si cumple los tiempos de cortocircuito establecidos en el procedimiento de operación 12.3 y se observará cómo evoluciona la potencia activa y reactiva en el aerogenerador y en el nudo de 20 kV.
- 5) Una vez realizada la primera simulación completa, con la misma potencia de cortocircuito de red se modificará la potencia que está volcando el aerogenerador a la red. El proceso se repite varias veces para ver cómo se comporta el sistema en función de la energía que se está generando.
- 6) Por último se repetirán los 5 primeros pasos para diferentes potencias de cortocircuito de red, con la finalidad de observar la influencia en la falta.

La estructura para todas las simulaciones sin compensadores estáticos va a tener dos figuras con varias gráficas, la primera mostrará la evolución de la potencia activa, reactiva y la velocidad de giro de la máquina de inducción y en la segunda se mostrará la evolución de la potencia activa, reactiva, la tensión y la corriente del nudo de 20 kV.

#### 4.2.1. Primera simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	7,95	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,25	(s)

Tabla 14.- Parámetros primera simulación sin compensador estático.

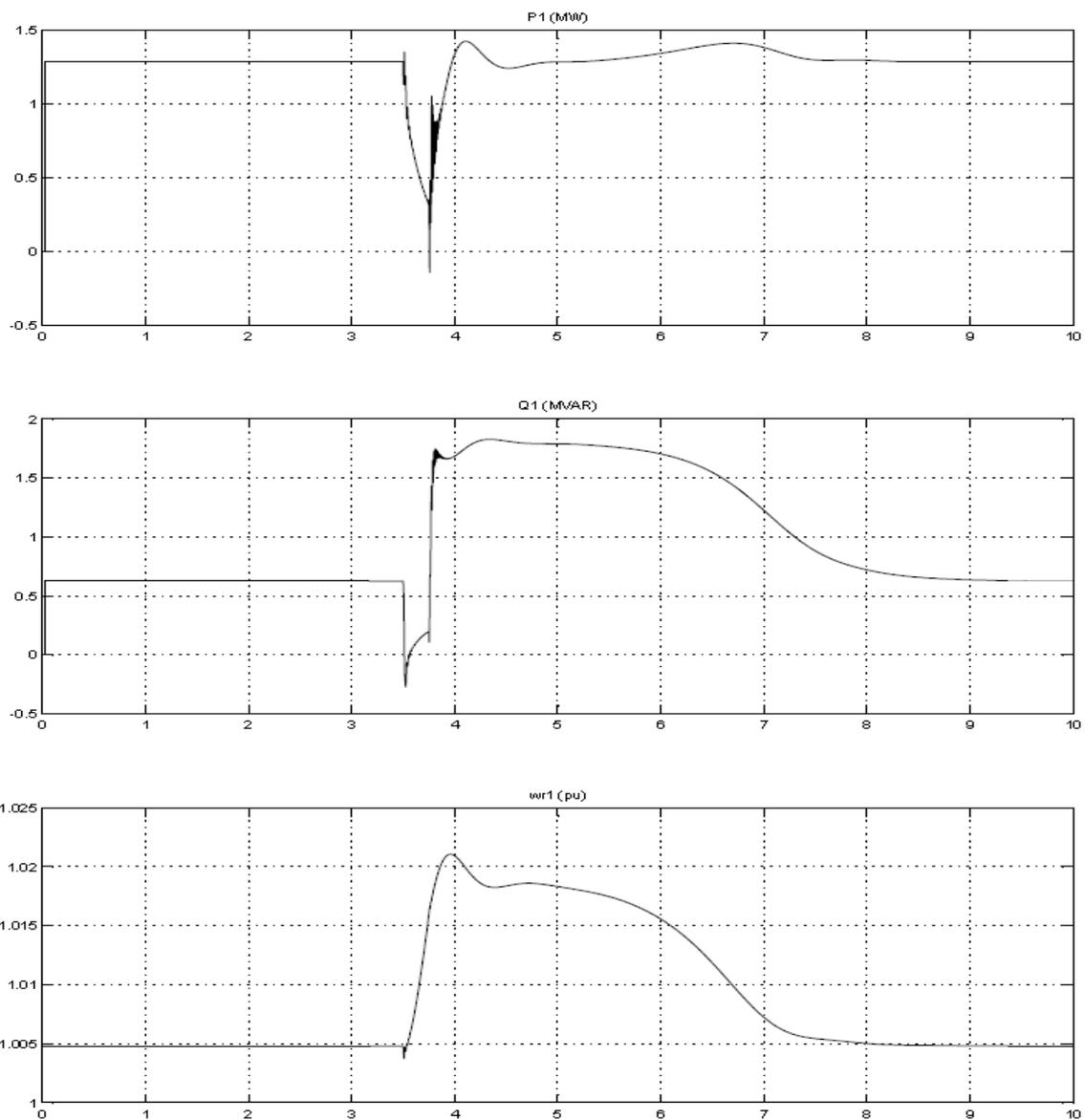
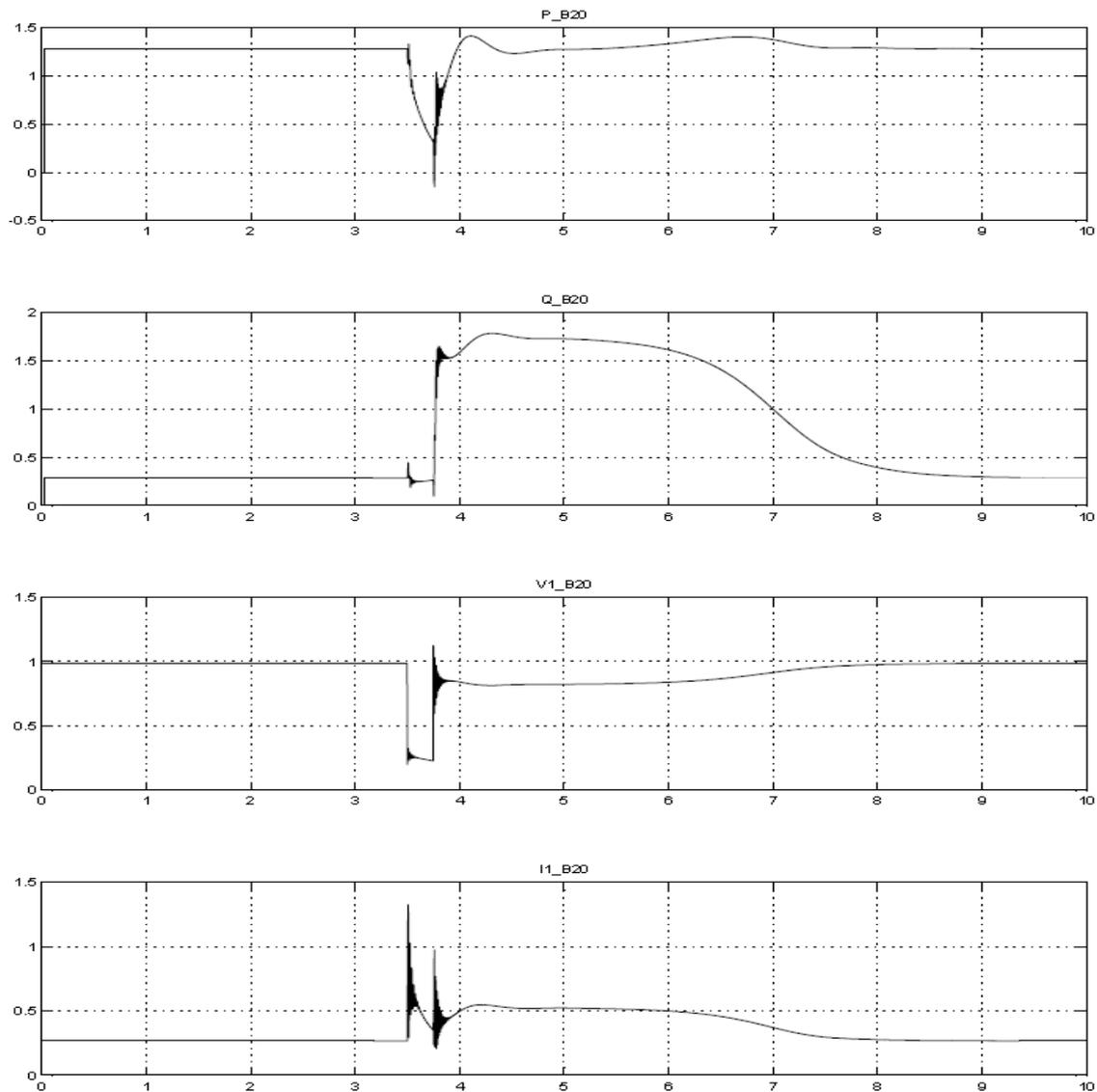


Figura 76.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 1.



**Figura 77.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 1.**

En la figura 76 se observa que al inicio de la falta hay una caída de potencia activa y reactiva en el aerogenerador donde se ve que la recuperación de potencia activa se produce de una forma más rápida que la de potencia reactiva estando esta más ligada a la velocidad de giro de la máquina. En cuanto a la velocidad de giro del generador se observa cómo se acelera durante la falta, necesitando varios segundos hasta que se recupera sin cumplir el tiempo mínimo de falta de 0,5 segundos del P.O. 12.3.

En la figura 77 la evolución de la potencia activa es igual que la de la figura 76, al igual que la potencia reactiva después del despeje de falta. Antes del despeje de falta la potencia reactiva cae menos por los condensadores conectados a la salida del aerogenerador. La tensión en el nudo cae en el momento de la falta y se recupera en el despeje hasta 0,82 p.u. sin cumplir tampoco el tiempo de recuperación de falta de 0,5 s para llegar al 0,85 p.u. establecido. En cuanto a la corriente se producen dos picos en el momento de la falta y el despeje, volviéndose estable a la par que la velocidad de giro.

#### 4.2.2. Segunda simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,7119	(p. u.)
Velocidad del viento	11,48	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	0,00334	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	7,80	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,503	(s)

Tabla 15.- Parámetros segunda simulación sin compensador estático.

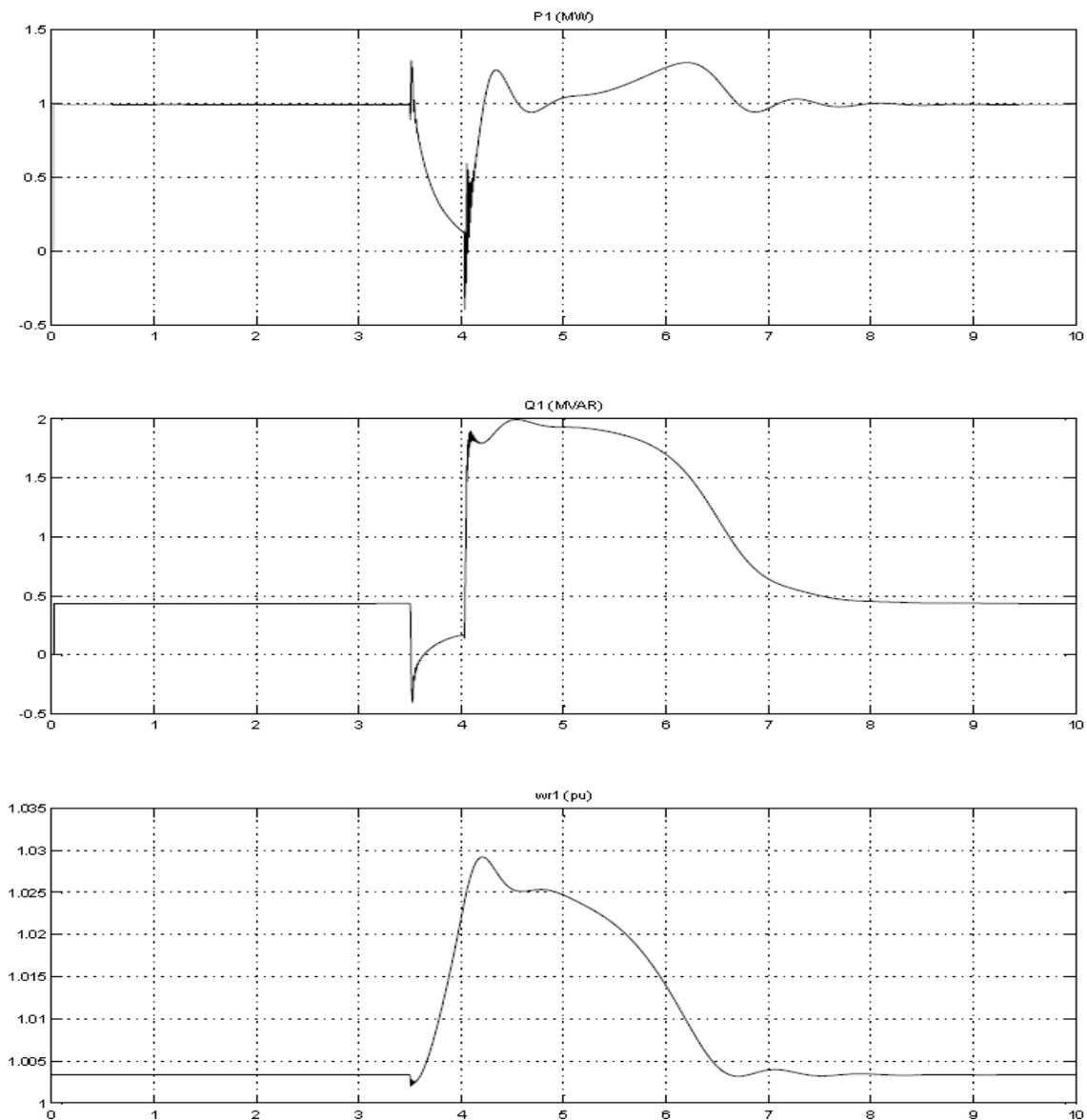
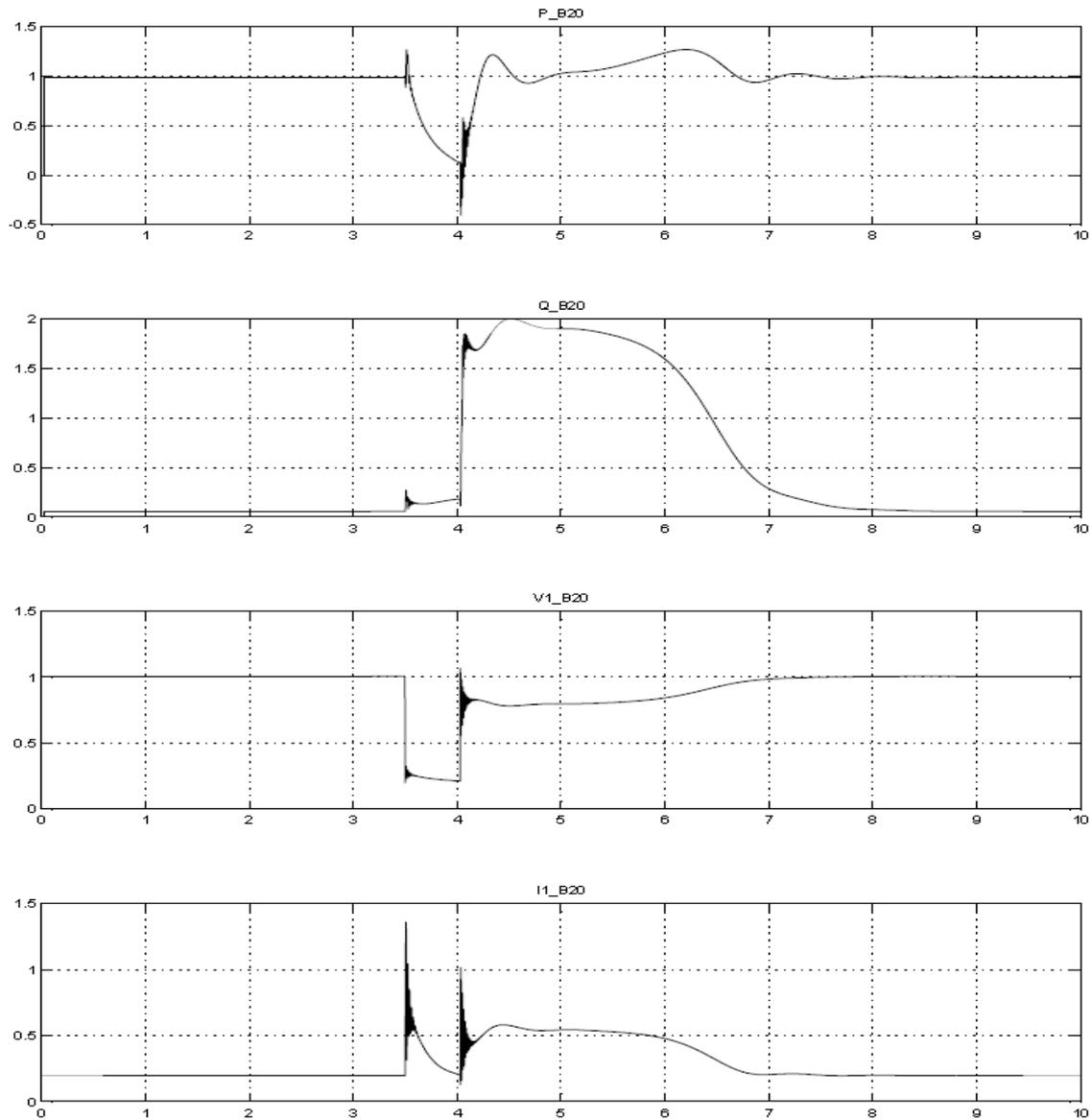


Figura 78.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 2.



**Figura 79.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 2.**

En la figura 78 la evolución de la potencia activa, la potencia reactiva y la velocidad de giro del aerogenerador evolucionan igual que en la figura 76 pero con la diferencia de que al haber disminuido la potencia que produce la máquina, no está tan saturada y aguanta durante más tiempo la falta cumpliendo en este aspecto el P.O. 12.3.

La figura 79 se comporta prácticamente igual que la figura 77 de la simulación anterior pero con la diferencia de que soporta mejor el hueco de tensión ya que para forzar el límite de la máquina se ha podido bajar la resistencia de falta/fase. Otra diferencia se encuentra en la potencia reactiva que se da en el momento de la falta donde se consume un mínimo de potencia reactiva debido a la disminución de la resistencia por fase. En este caso se cumplen todos los requisitos del P.O. 12.3. a excepción del tiempo de recuperación de tensión que está en un valor de 0,82 p.u. a los 0,5 segundos del despeje de falta.

### 4.2.3. Tercera simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p.u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00205	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	7,69	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,40	(s)

Tabla 16.- Parámetros tercera simulación sin compensador estático.

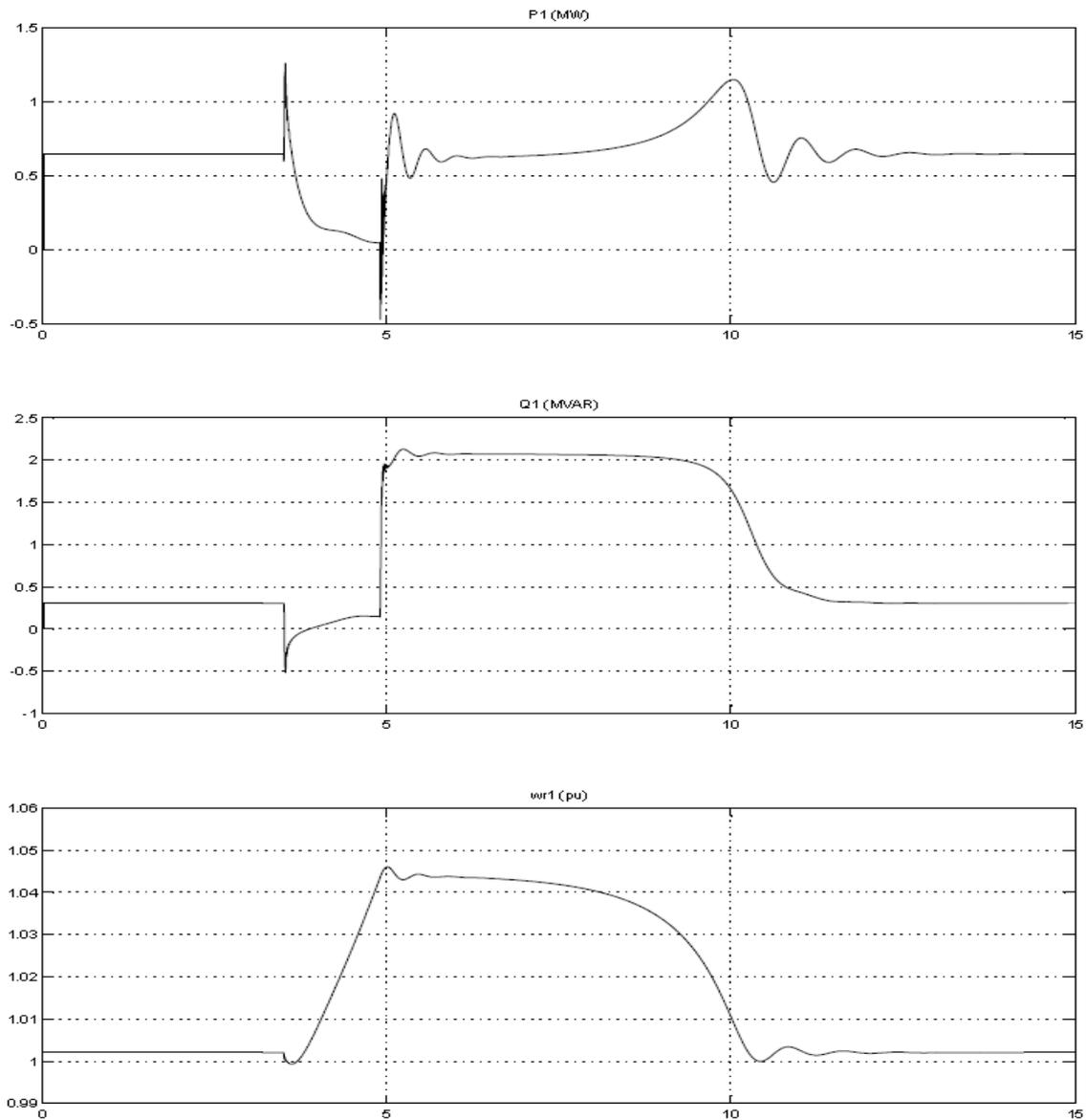
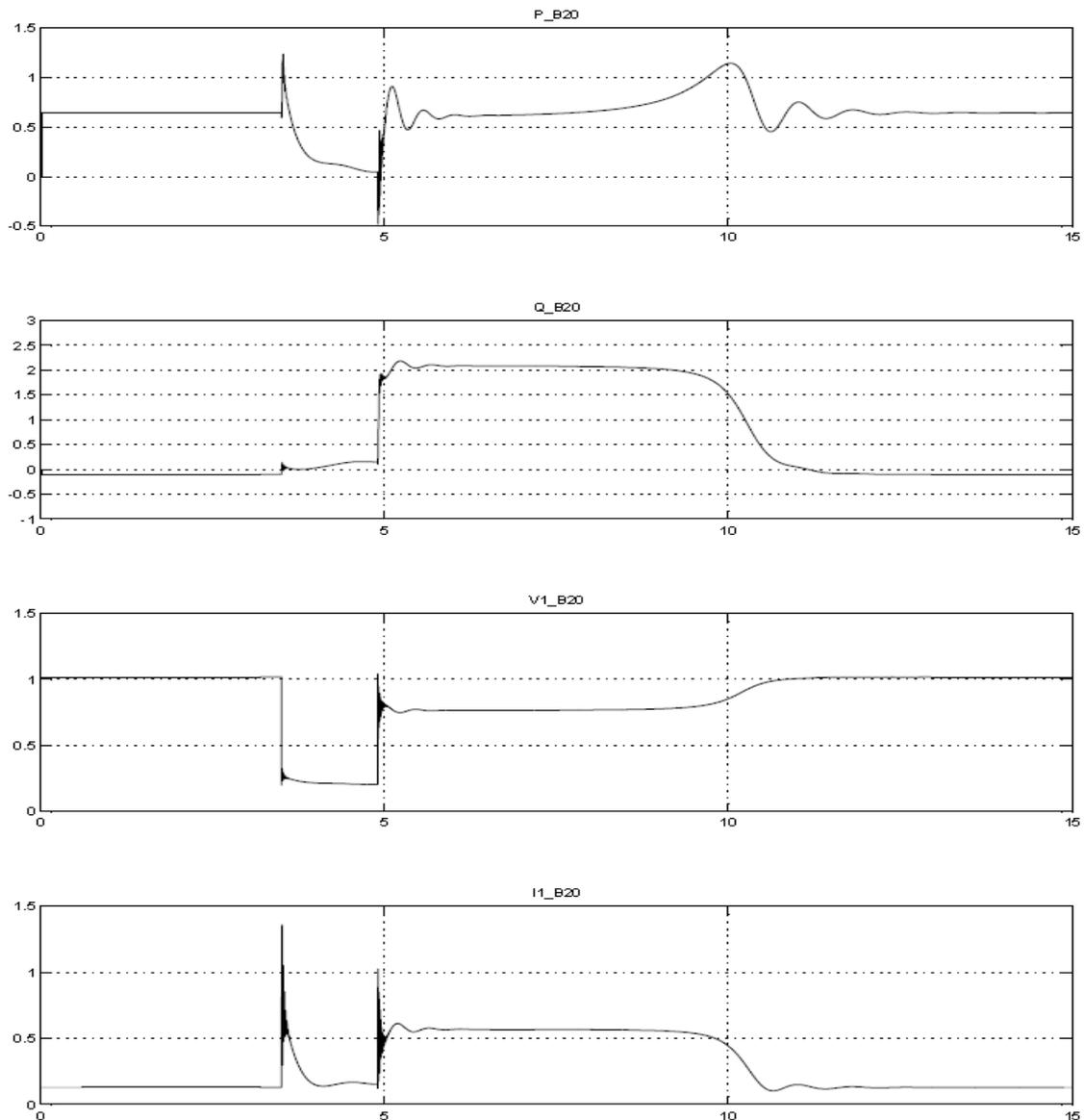


Figura 80.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador,3.



**Figura 81.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 3.**

En la figura 80, si seguimos bajando la potencia del aerogenerador en la evolución de la potencia activa se producen unas oscilaciones respecto a las dos primeras simulaciones sin compensador estático. La potencia reactiva y la velocidad de giro del aerogenerador evolucionan de la misma manera que las dos simulaciones anteriores pero aguantando un tiempo de 1,4 segundos sin perder la estabilidad del aerogenerador y cumpliendo el P.O. 12.3.

En la figura 81 también se pueden ver las oscilaciones producidas en la potencia activa en el nudo. En cuanto a la potencia reactiva hay un consumo ligeramente mayor de potencia reactiva en el momento de falta porque de nuevo se ha reducido la resistencia de falta/fase, por los demás se comporta igual que en las simulaciones anteriores también. La tensión sigue la misma evolución sin cumplir el P.O. 12.3. en cuanto a la recuperación de tensión. La evolución de la corriente sigue la misma dinámica que las simulaciones anteriores.

#### 4.2.4. Cuarta simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	50	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	6,48	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,27	(s)

Tabla 17.- Parámetros cuarta simulación sin compensador estático.

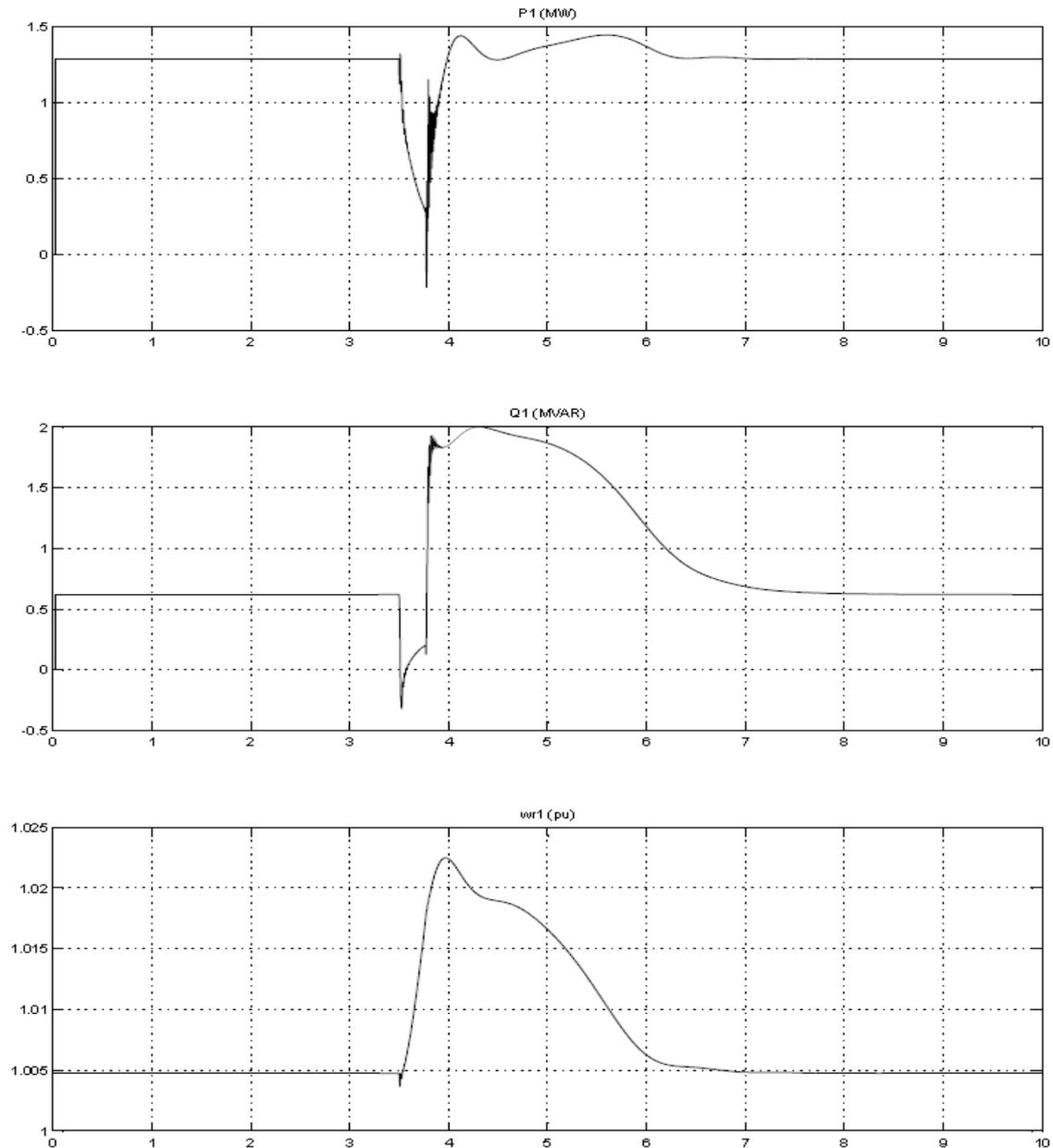
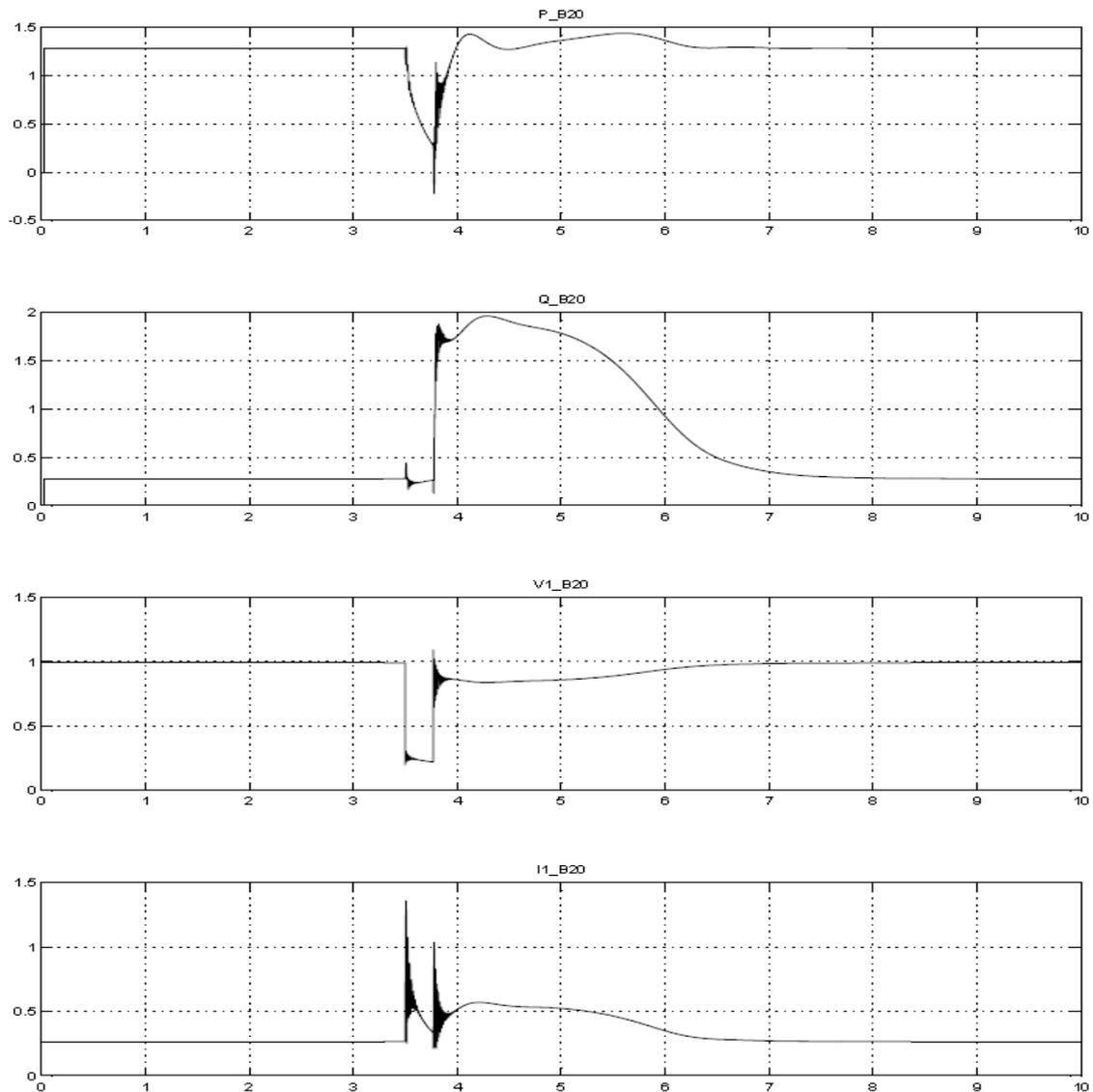


Figura 82.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 4.



**Figura 83.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 4.**

En la figura 82 de esta simulación se ha aumentado la potencia de cortocircuito de la red y no se aprecia ninguna diferencia respecto a la figura 76 de la simulación 1, comportándose de igual forma tanto la potencia activa como la potencia reactiva y la velocidad de giro de la máquina y sin cumplir el tiempo normativo de 0,5 segundos de duración del P.O. 12.3.

En la figura 83 la evolución de la potencia activa en el nudo de 20 KV es la misma que en el aerogenerador apreciando una caída de la misma durante la falta y una recuperación bastante rápida de la potencia cuando se despeja la falta. El comportamiento de la potencia reactiva es el mismo que el de la figura 77 de la primera simulación.

Donde realmente se aprecia la diferencia es en la recuperación de tensión de la falta llegando a un valor de 0,86 p.u. cumpliendo el tiempo de estabilidad de tensión del P.O. 12.3. y por tanto estabilizándose la corriente más rápido.

#### 4.2.5. Quinta simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	50	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,7119	(p.u.)
Velocidad del viento	11,48	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00334	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	6,36	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,507	(s)

Tabla 18.- Parámetros quinta simulación sin compensador estático.

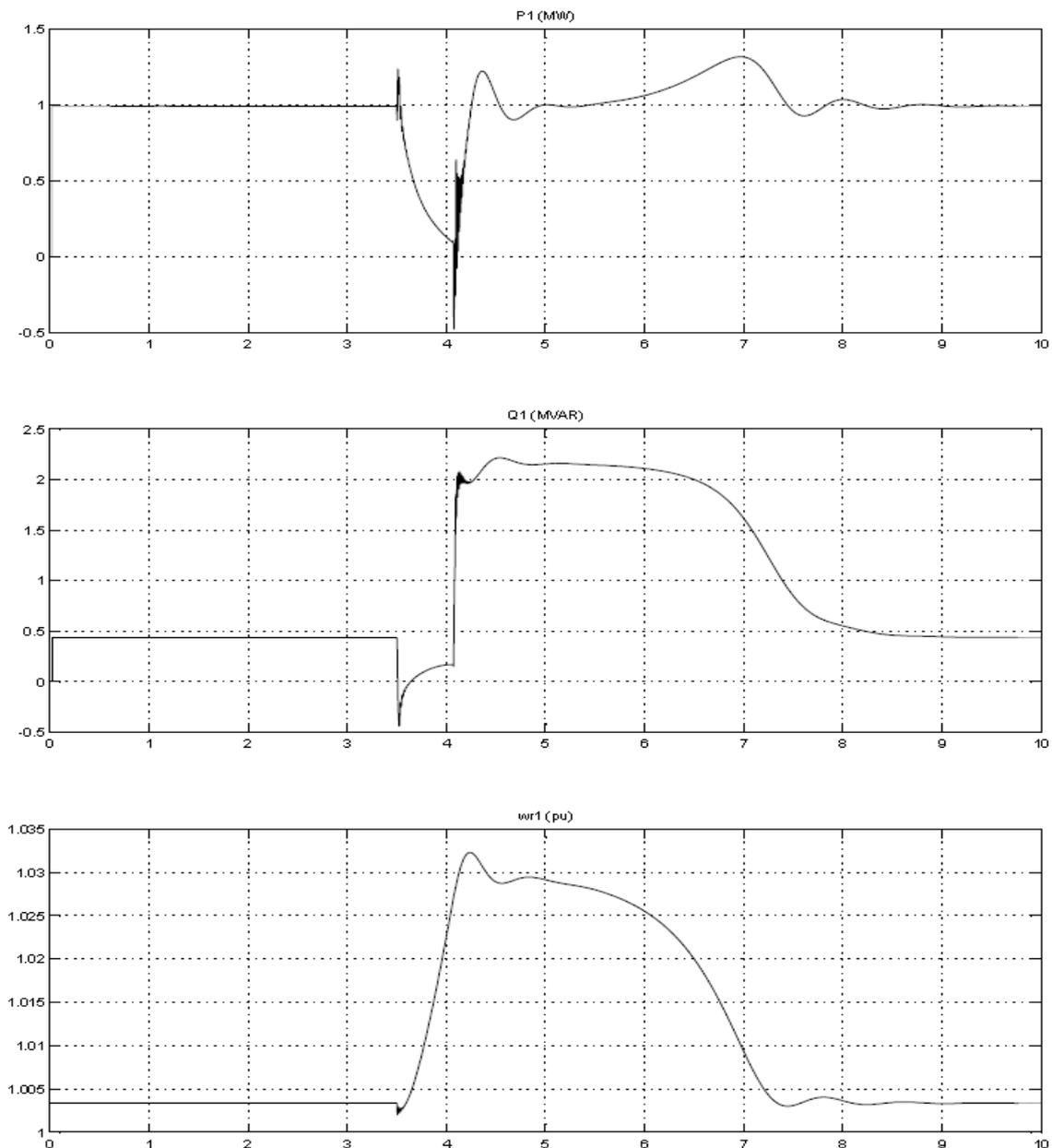
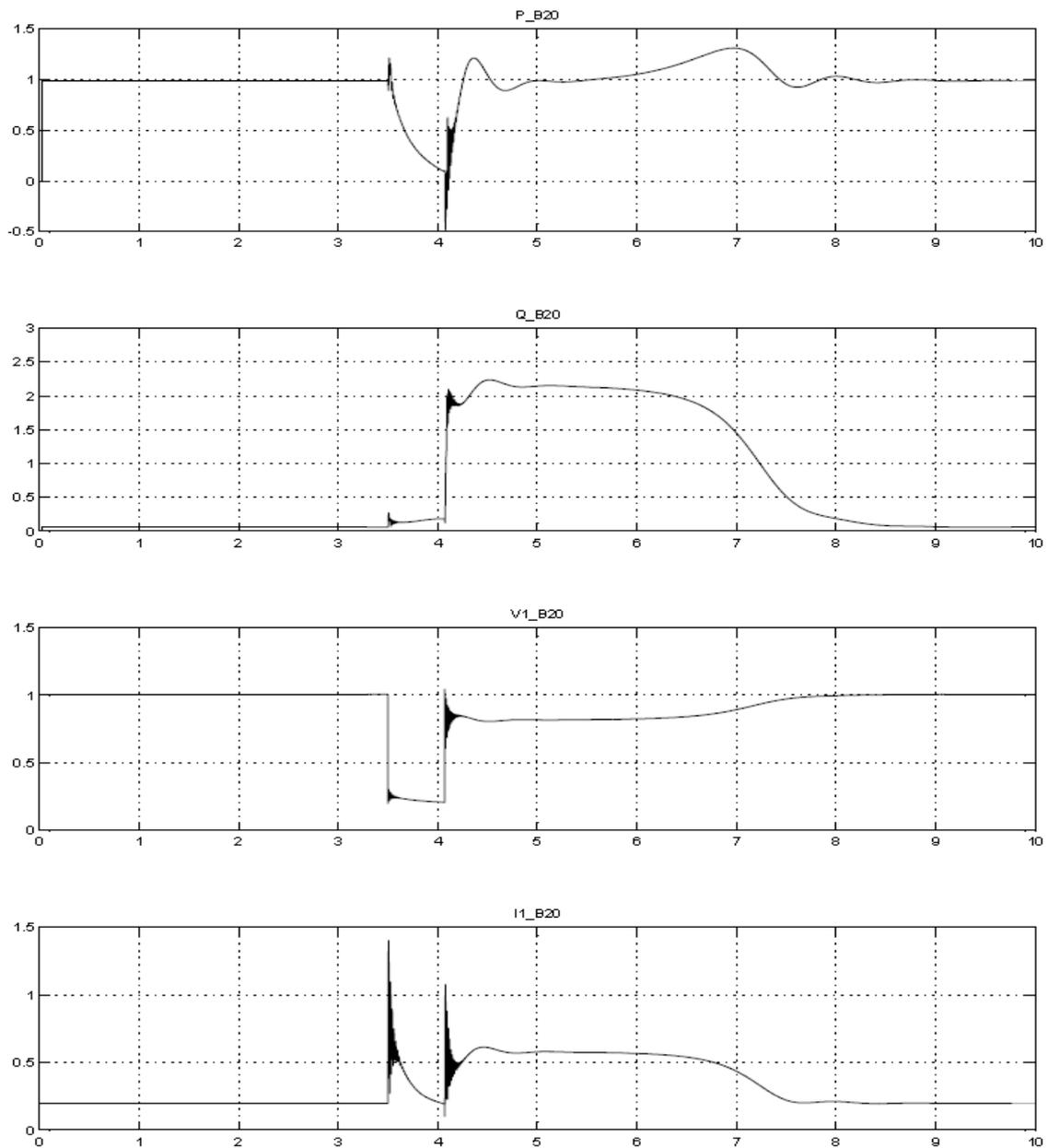


Figura 84.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensado, 5.



**Figura 85.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 5.**

En la figura 84 hay una caída de la potencia reactiva que se estabiliza con el despeje de falta. También se da una caída de potencia reactiva durante la falta y una estabilización de esta más lenta que la de la potencia activa. El tiempo de cortocircuito es mayor que en la cuarta simulación porque la máquina entrega menor potencia y se cumple el tiempo de duración de la falta del P.O. 12.3.

Las gráficas del nudo de la figura 85 tienen un comportamiento muy similar al de la cuarta simulación cumpliendo también con la recuperación de tensión a 0,86 p.u. en un tiempo inferior a 0,5 segundos y por tanto cumpliendo el procedimiento P.O. 12.3.

#### 4.2.6. Sexta simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	50	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0.65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p.u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00205	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	6,30	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,49	(s)

Tabla 19.- Parámetros sexta simulación sin compensador estático.

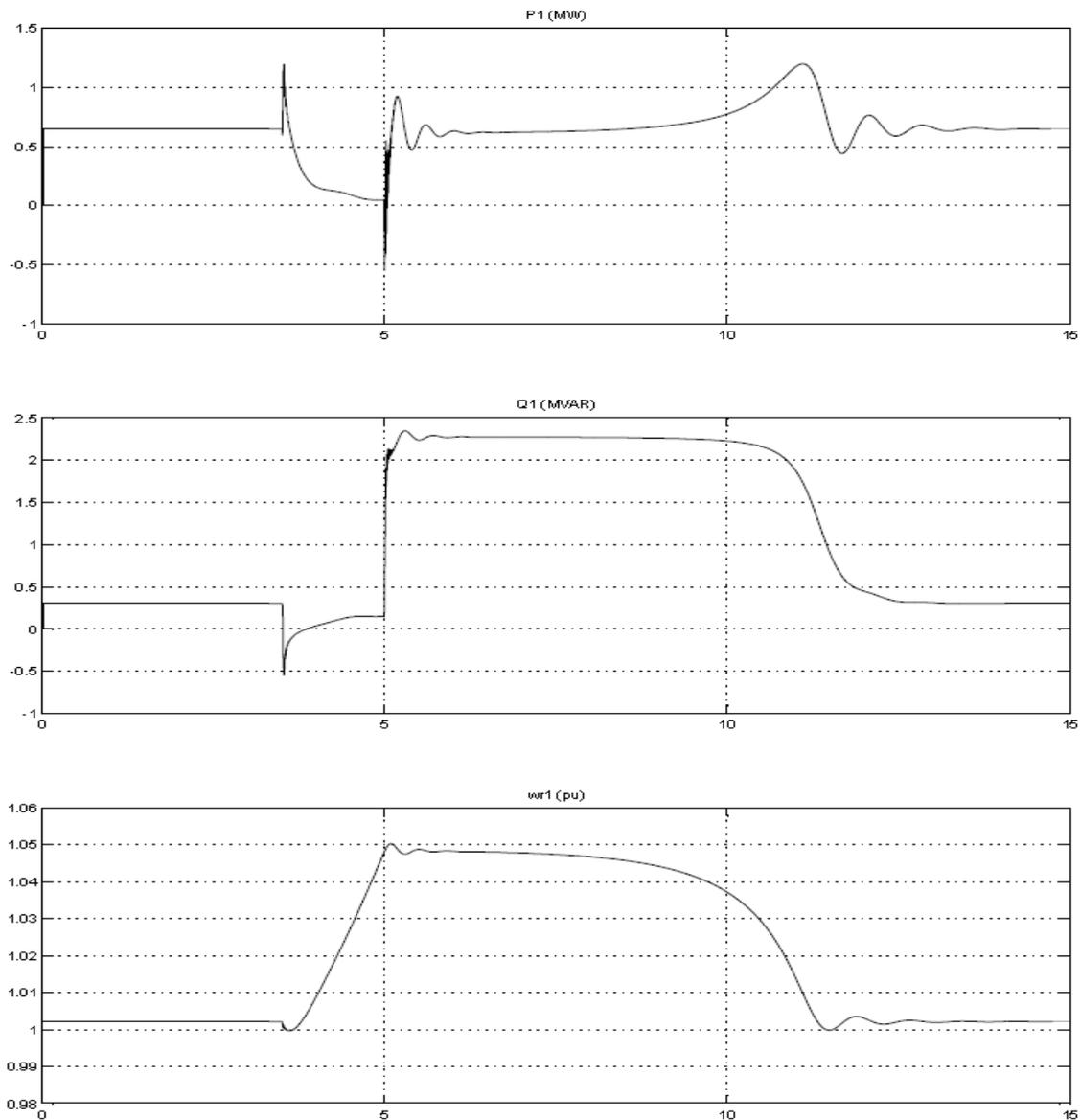
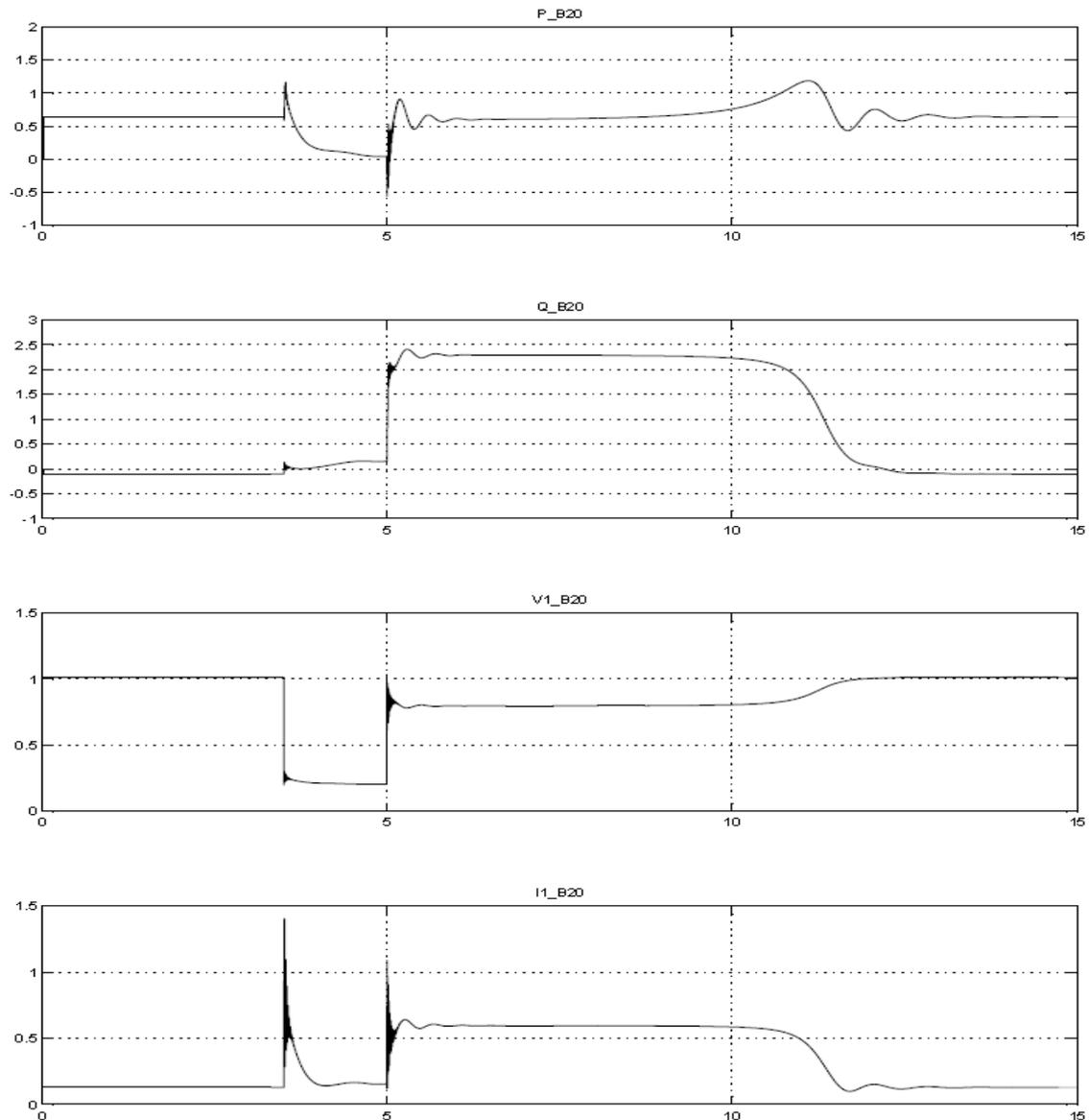


Figura 86.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 6.



**Figura 87.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 6.**

En la figura 86 la evolución de la potencia activa sufre una caída durante la falta y una recuperación con ciertas oscilaciones debidas al porcentaje de funcionamiento de la máquina, la potencia reactiva evoluciona con una caída durante la falta seguida de una recuperación acorde con la velocidad de giro de la máquina. Se cumplen los tiempos de duración de falta del P.O. 12.3.

La evolución de la potencia activa de la figura 87 es la misma que en el aerogenerador en la figura 86. En la evolución de la potencia reactiva se produce un pequeño incremento en el nudo por la carga capacitiva trifásica del modelo, la tensión se recupera hasta un valor de 0,86 p.u. y cumple el P.O. 12.3. La corriente de la figura 87 evoluciona con dos picos de tensión en el momento de falta y despeje y con una estabilización de corriente acorde con la velocidad de giro del aerogenerador.

#### 4.2.7. Séptima simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	5,25	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,30	(s)

Tabla 20.- Parámetros séptima simulación sin compensador estático.

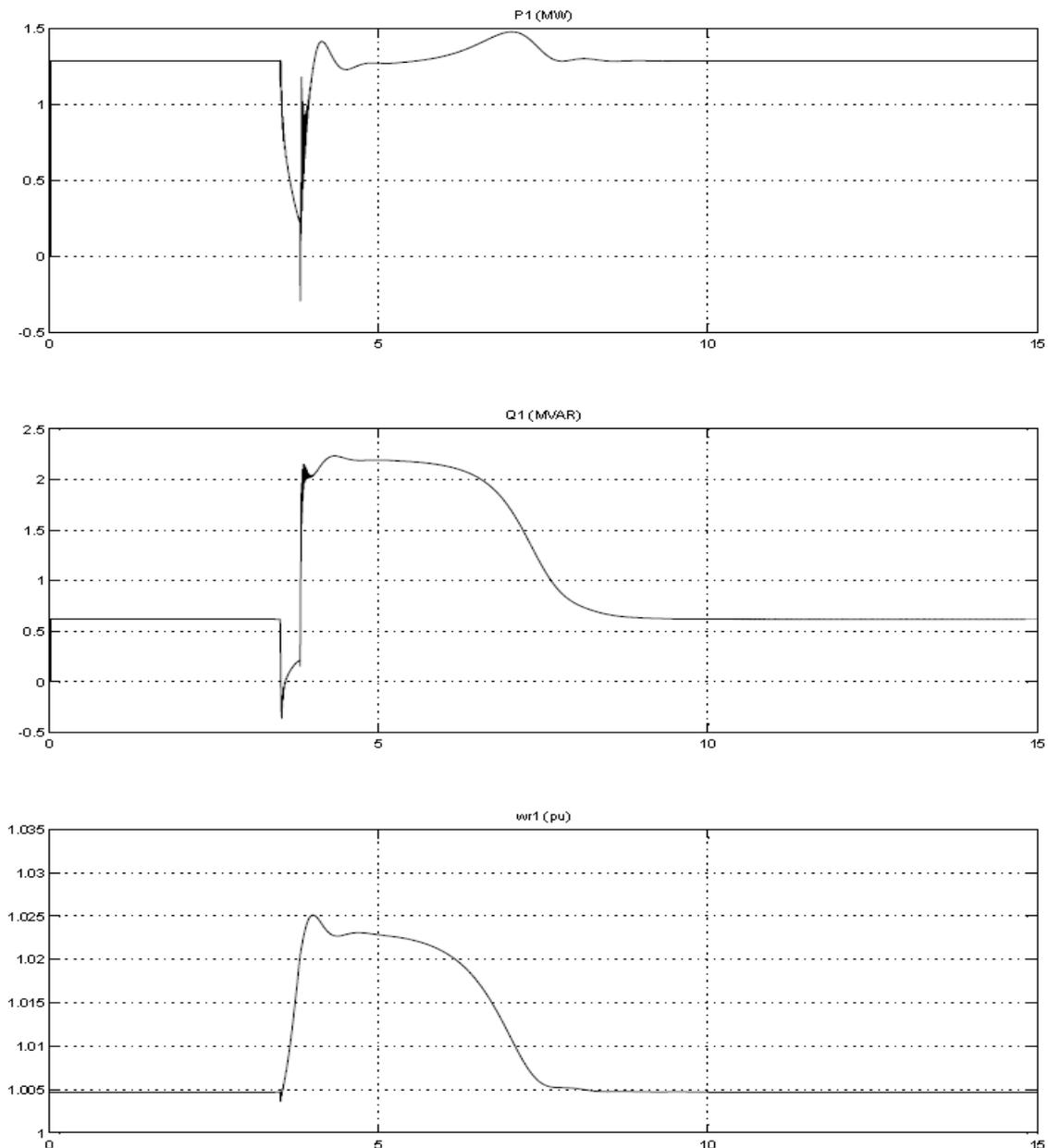
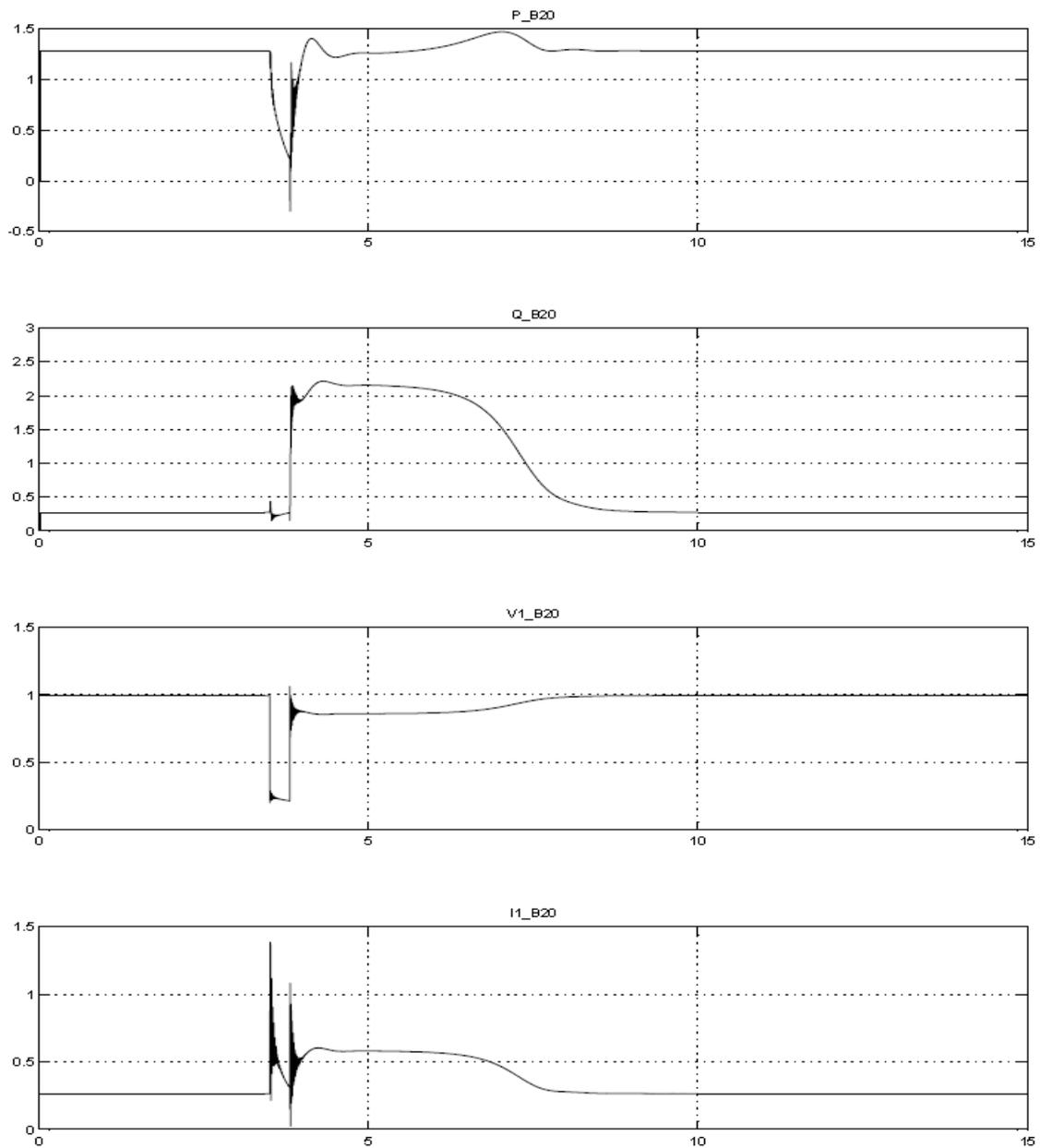


Figura 88.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 7.



**Figura 89.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 7.**

La diferencia de la séptima simulación respecto a la cuarta simulación es el aumento de la potencia de cortocircuito, pudiendo reducir más la resistencia de falta/fase y teniendo una recuperación de tensión en la figura 89 mayor llegando a un valor de 0,9 p.u.

En la simulación de la figura 88 sigue sin cumplirse el tiempo de duración de cortocircuito de P.O. 12.3. aunque respecto a las simulaciones con las mismas potencias y se aprecia un incremento leve del tiempo de duración de cortocircuito, ya que la potencia de cortocircuito cuanto mayor es más estable es la tensión.

En cuanto a las demás curvas de las figuras 88 y 89 siguen el mismo comportamiento que las demás simulaciones.

#### 4.2.8. Octava simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,7119	(p.u.)
Velocidad del viento	11,48	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00334	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	5,18	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,6	(s)

Tabla 21.- Parámetros octava simulación sin compensador estático.

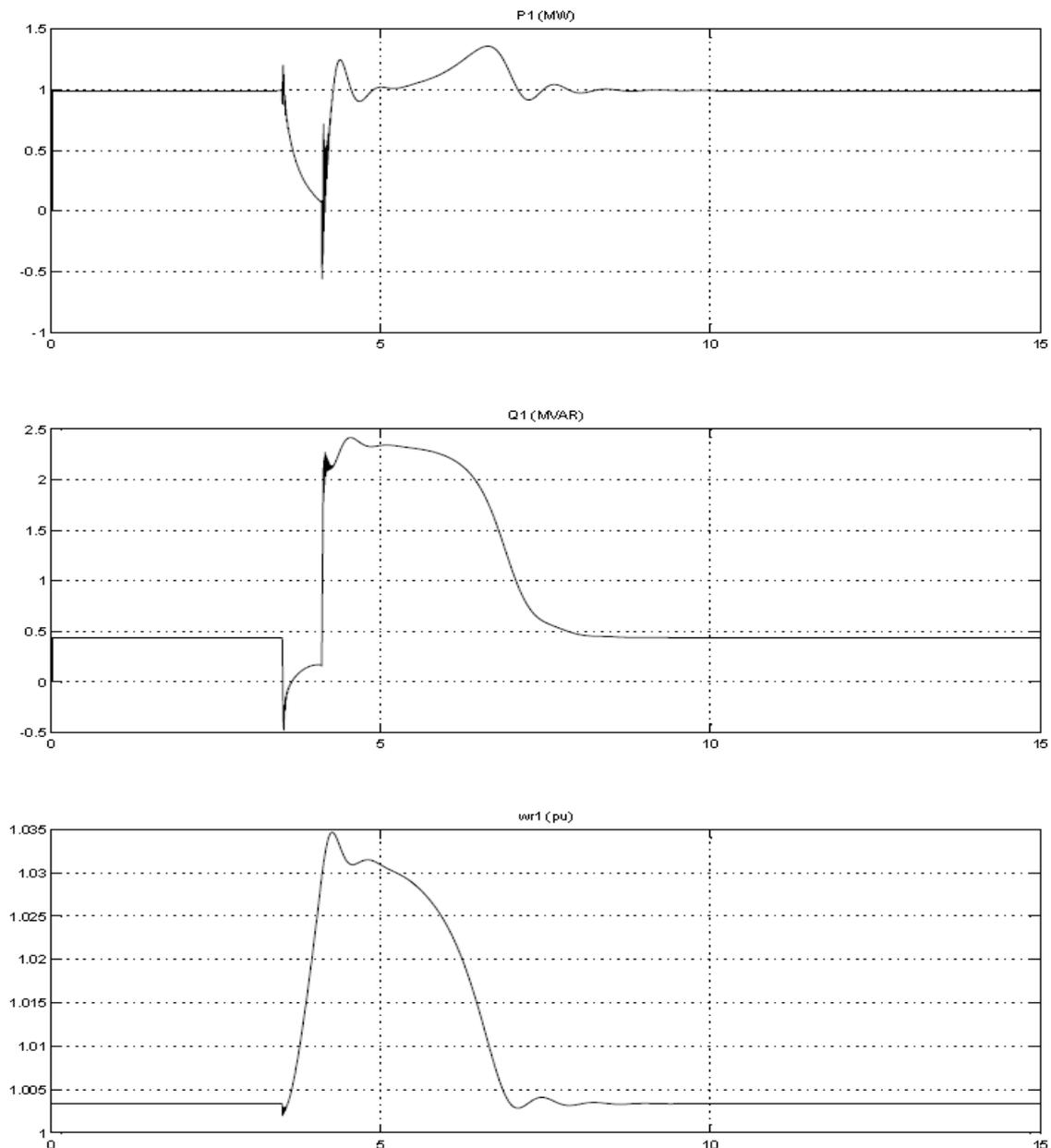
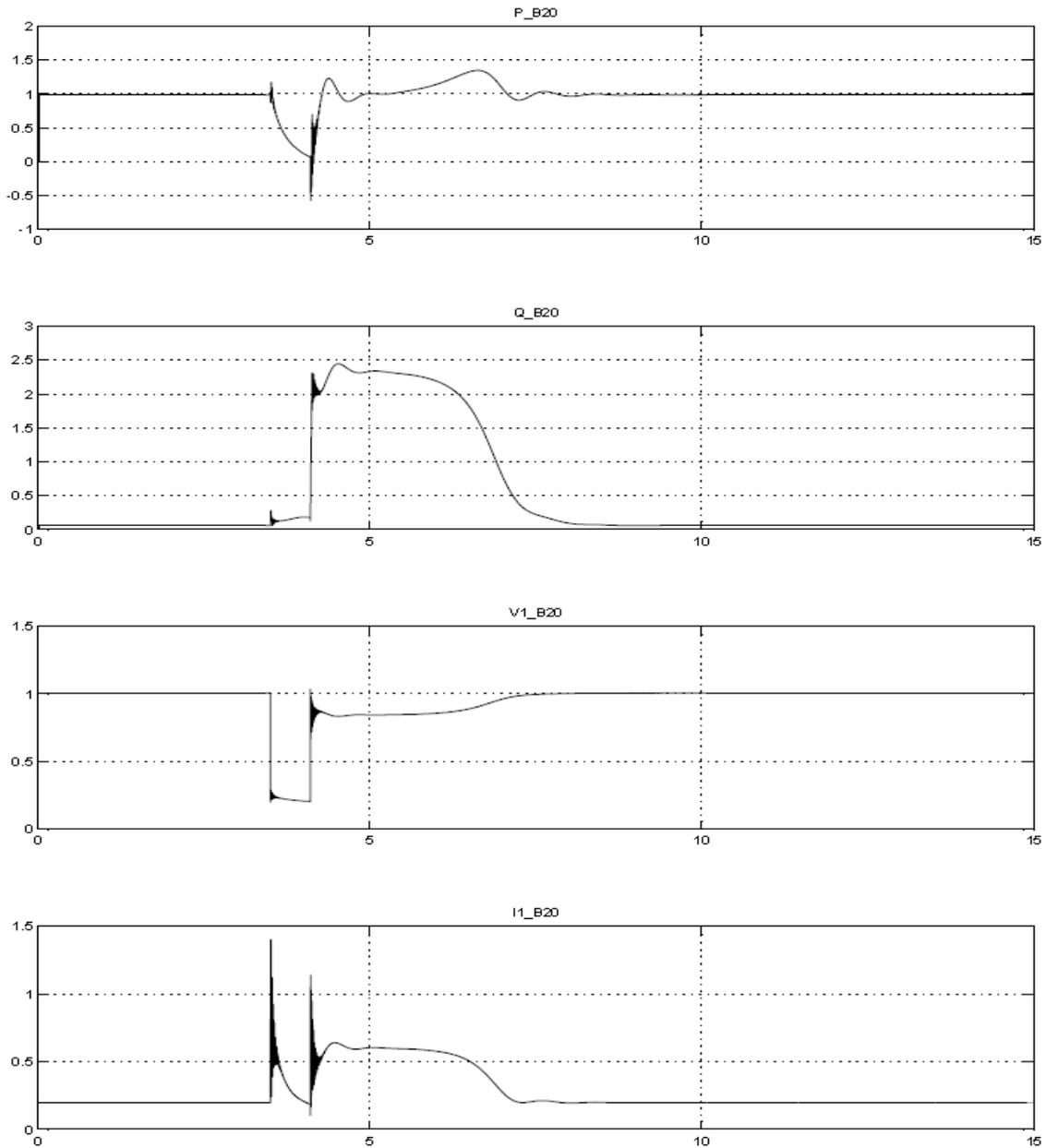


Figura 90.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 8.



**Figura 91.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 8.**

Si se continúa bajando la potencia del aerogenerador y subiendo la potencia de cortocircuito se observa que en la figura 90 mejora el comportamiento respecto a la séptima simulación aumentando el tiempo de duración del cortocircuito cumpliendo con el P.O. 12.3. y mejorando la estabilidad del sistema, tanto en lo referente a la potencia activa del aerogenerador como en la potencia reactiva y la velocidad de giro.

Se observa en la figura 91 la como sigue mejorando la recuperación de tensión tras el despeje de la falta y a consecuencia de ello también se reduce la corriente hasta que se estabiliza el sistema.

#### 4.2.9. Novena simulación sin compensador estático.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p.u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00205	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	5,13	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,57	(s)

Tabla 22.- Parámetros novena simulación sin compensador estático.

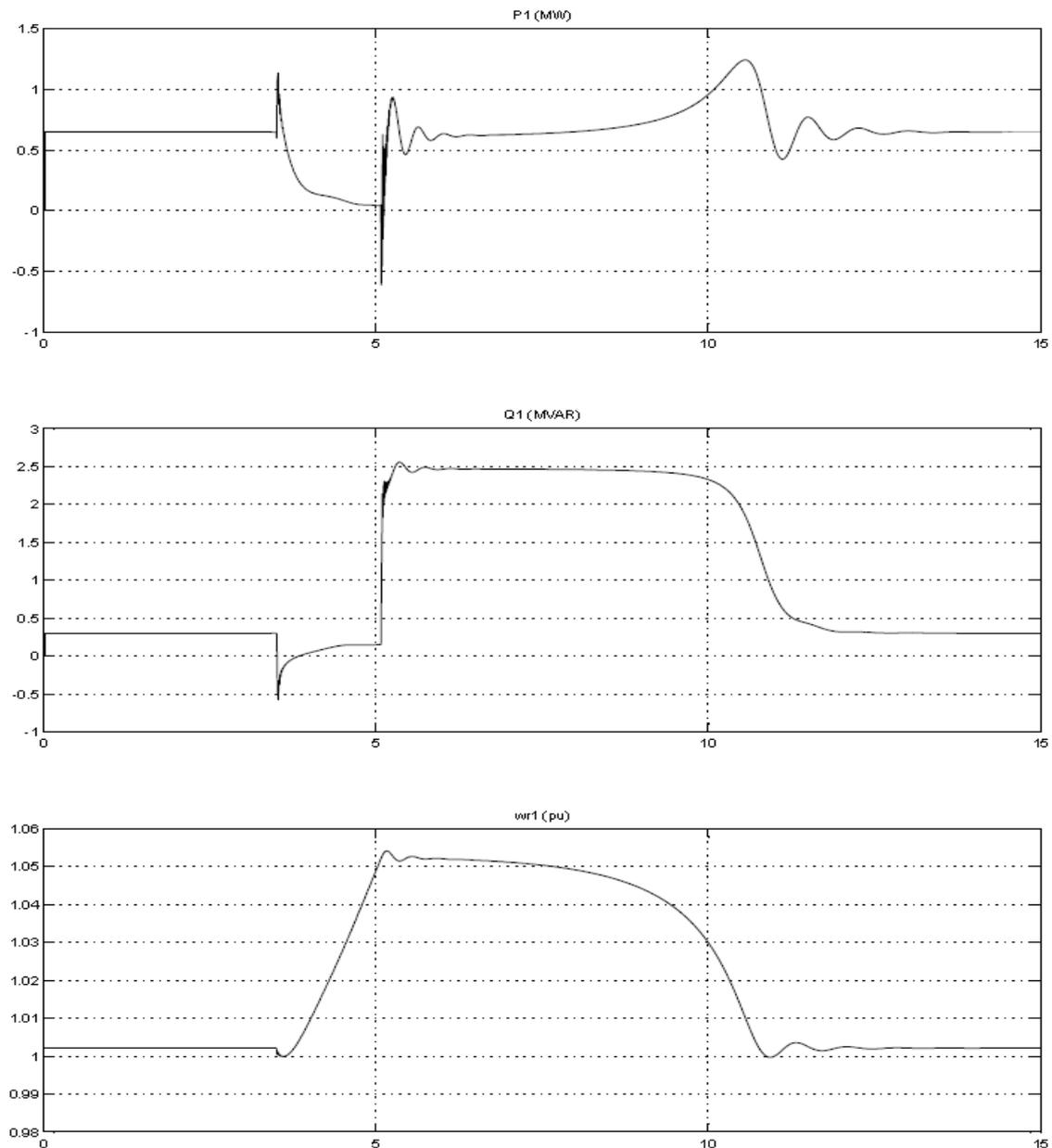
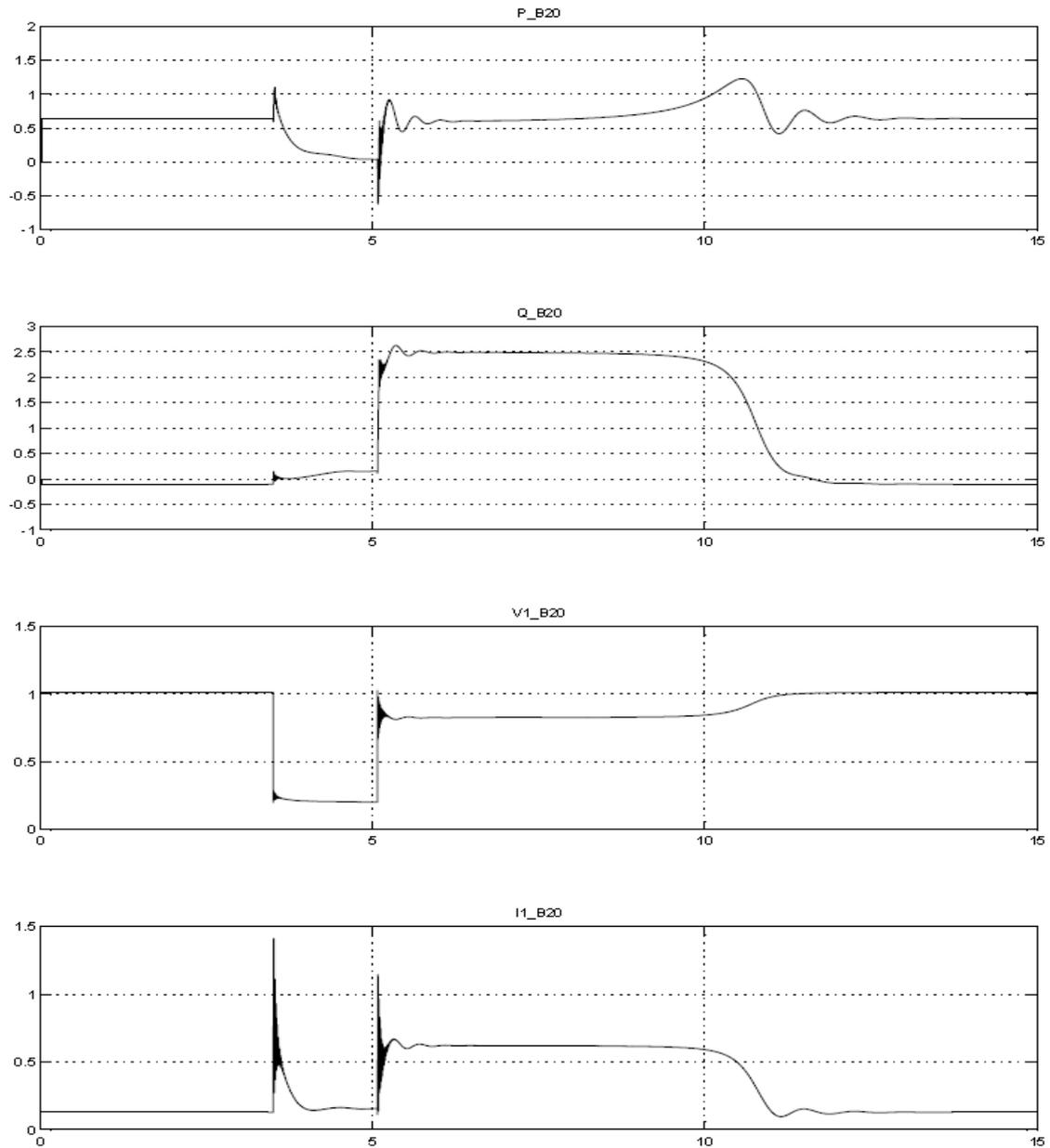


Figura 92.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción sin compensador, 9.



**Figura 93.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV sin compensador, 9.**

En las figuras 92 y 93 de la última simulación sin compensador estático se puede apreciar el mejor comportamiento de las simulaciones realizadas hasta el momento, con la resistencia de falta/fase más pequeña y el mayor tiempo de cortocircuito hasta que se despeja la falta.

Esta simulación cumple totalmente el P.O. 12.3. tanto en tiempo de duración de la falta, como en tiempo de estabilización de tensión y de recuperación de la falta. Es el caso más favorable ante una falta trifásica, el de mayor potencia de cortocircuito y menor potencia generada por el aerogenerador.

### 4.3. Simulaciones con compensadores estáticos.

En el modelo con compensadores estáticos de potencia reactiva, para determinar cómo mejora el comportamiento del sistema, vamos a realizar las simulaciones con los datos obtenidos en las simulaciones sin compensadores estáticos, entonces así podremos determinar el nuevo tiempo máximo de cortocircuito, y la recuperación de tensión en el sistema.

- Potencia de cortocircuito de red
- Potencia generada por la máquina de inducción
- Par a introducir en la máquina de inducción.
- Velocidad del viento.
- Deslizamiento de la máquina.
- Resistencia de falta/fase.

El objetivo de realizar las simulaciones con los mismos parámetros es muy claro, ya que así podremos hacer un análisis del comportamiento del sistema cuando no utilizamos ningún tipo de compensación de energía reactiva y cuando estamos utilizando los dos tipos de dispositivos compensadores de energía reactiva.

Para estas simulaciones, no utilizaremos todas las realizadas en el modelo sin compensadores, sino que solo utilizaremos los datos de dos simulaciones por cada potencia de cortocircuito, porque el objetivo es ver como varían los datos cuando variamos la potencia de cortocircuito y la potencia generada por la máquina de inducción.

La estructura para todas las simulaciones con compensadores estáticos, tanto SVC como STATCOM, va a tener tres figuras. En la primera se mostrarán tres gráficas con la evolución de la potencia activa, reactiva y la velocidad de giro de la máquina de inducción. En la segunda se mostrarán otras tres gráficas con la evolución de la potencia activa, reactiva, la tensión y la corriente del nudo de 20 KV. Hasta aquí serán iguales que la simulaciones sin compensadores estáticos. En la tercera figura se mostrarán solo dos gráficas con la evolución de la tensión medida por los compensadores estáticos y potencia reactiva inyectada en el punto de conexión de estos dispositivos, respectivamente.

#### 4.3.1. Primera simulación con compensador estático SVC.

Parámetros	Valor	Unidades
<b>Potencia de cortocircuito</b>	28	(MVA)
<b>Potencia generada por la máquina de inducción</b>	1,3	(MW)
<b>Par a introducir en la máquina de inducción</b>	0,9241	(p. u.)
<b>Velocidad del viento</b>	14,34	(m/s)
<b>Deslizamiento de la máquina</b>	-0,00479	(p. u.)
<b>Resistencia de falta/fase</b>	7,95	( $\Omega$ )
<b>Tiempo de duración del cortocircuito</b>	0,34	(s)

Tabla 23.- Parámetros primera simulación con compensador estático SVC.

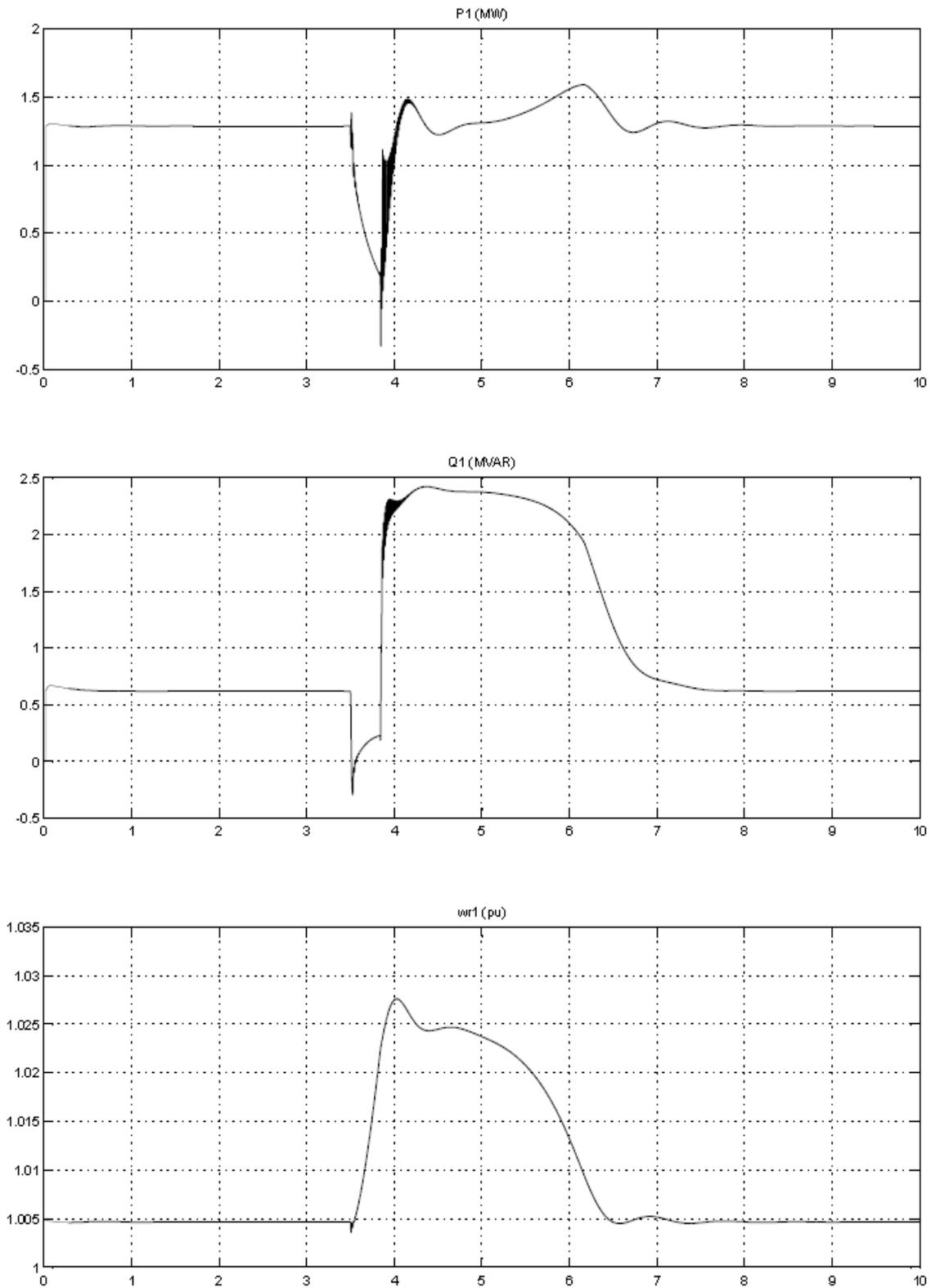


Figura 94.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 1.

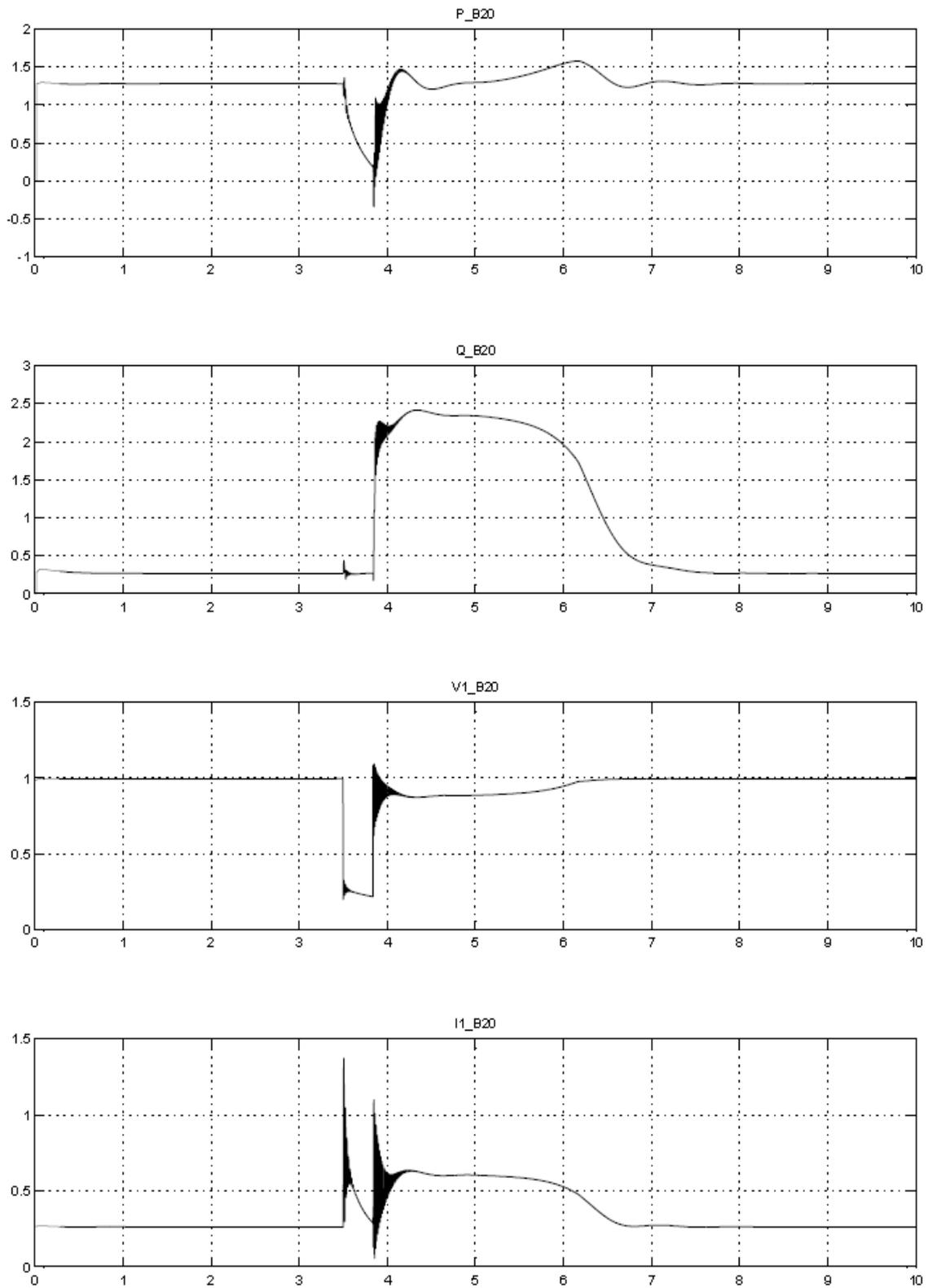
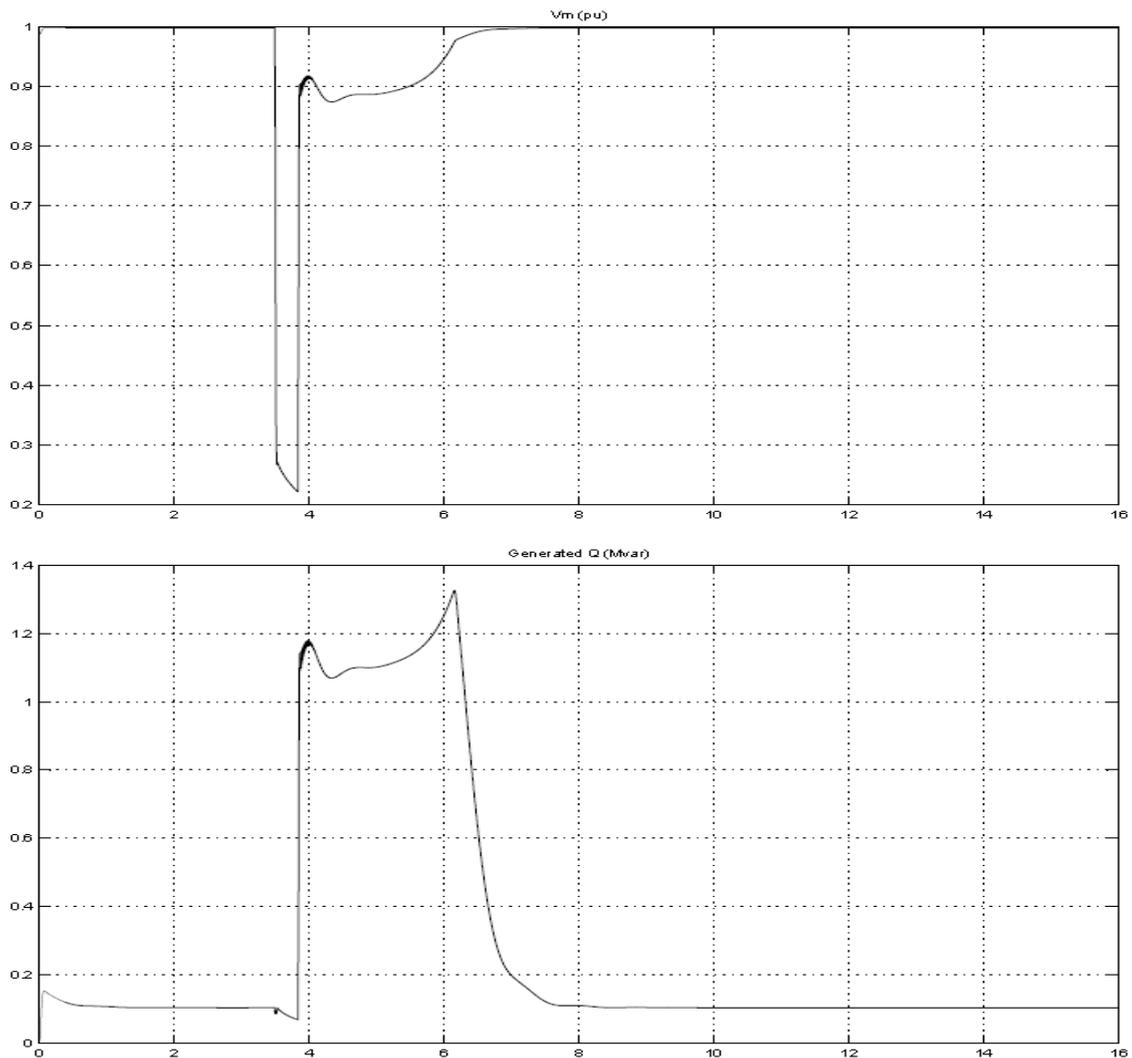


Figura 95.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 1.



**Figura 96.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 1.**

Si comparamos el comportamiento de la primera simulación sin compensador estático con la primera simulación con compensador estático SVC y los parámetros a variar con el mismo valor se puede observar la mejora del comportamiento del sistema.

En esta simulación en la figura 94 no se cumplen los tiempos necesarios de duración de la falta aunque se ven incrementados sin cumplir el P.O. 12.3.

En la figura 95 se ve el comportamiento de la potencia activa y reactiva que sigue la misma tendencia que en las simulaciones sin compensador estático, pero con la diferencia de que ahora para estabilizar la tensión después de la falta se inyecta mayor potencia reactiva cómo es posible ver en la curva de potencia generada del compensador estático de la figura 96. Además se ve la tensión que mide el compensador estático en esta figura y la mejora del comportamiento del sistema con este dispositivo aunque se observa la limitación de potencia reactiva del dispositivo ante bajas tensiones.

### 4.3.2. Segunda simulación con compensador estático SVC.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p.u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00205	(p.u.)
Resistencia de falta/fase	7,69	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,65	(s)

Tabla 24.- Parámetros segunda simulación con compensador estático SVC.

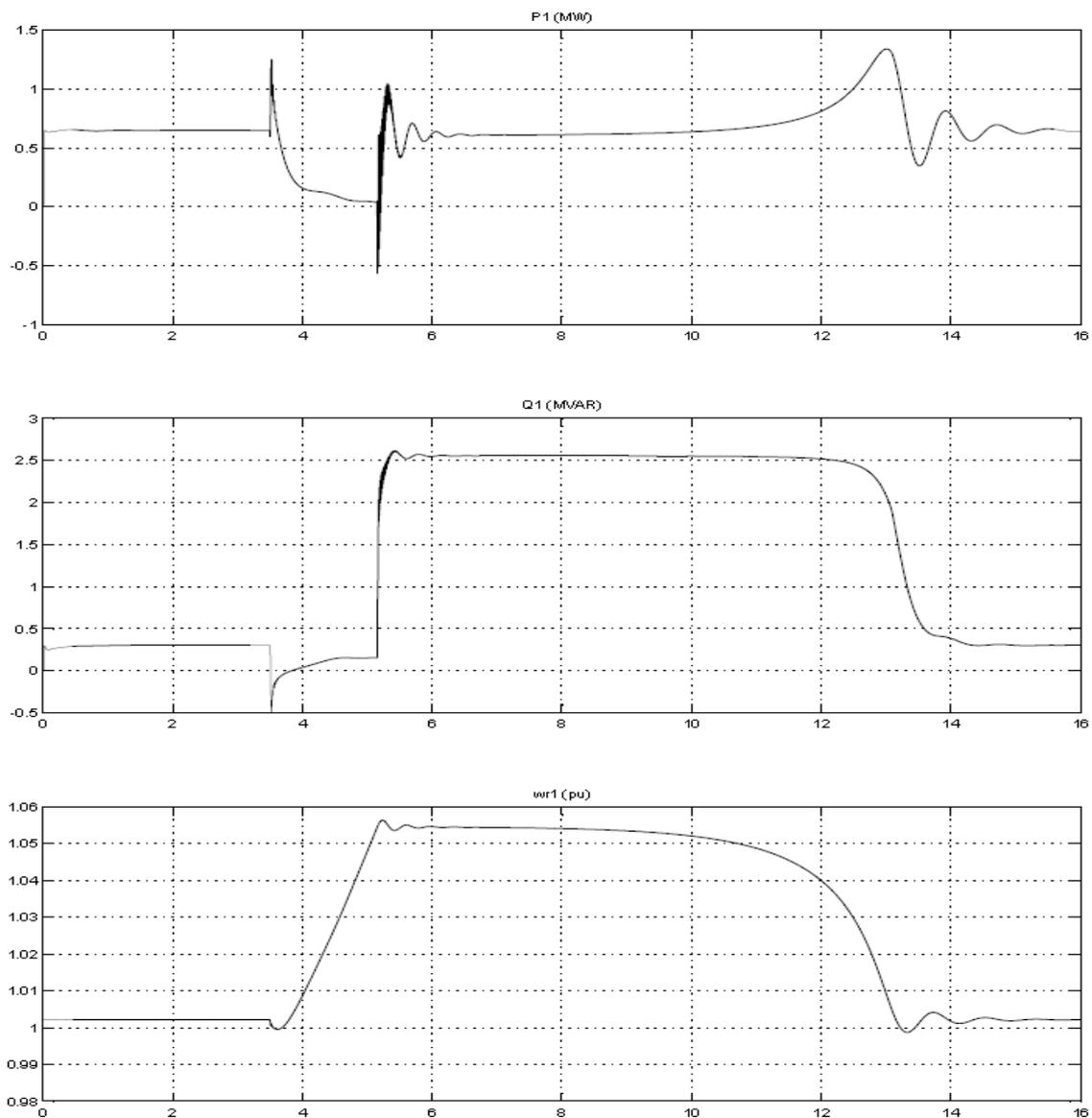


Figura 97.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 2.

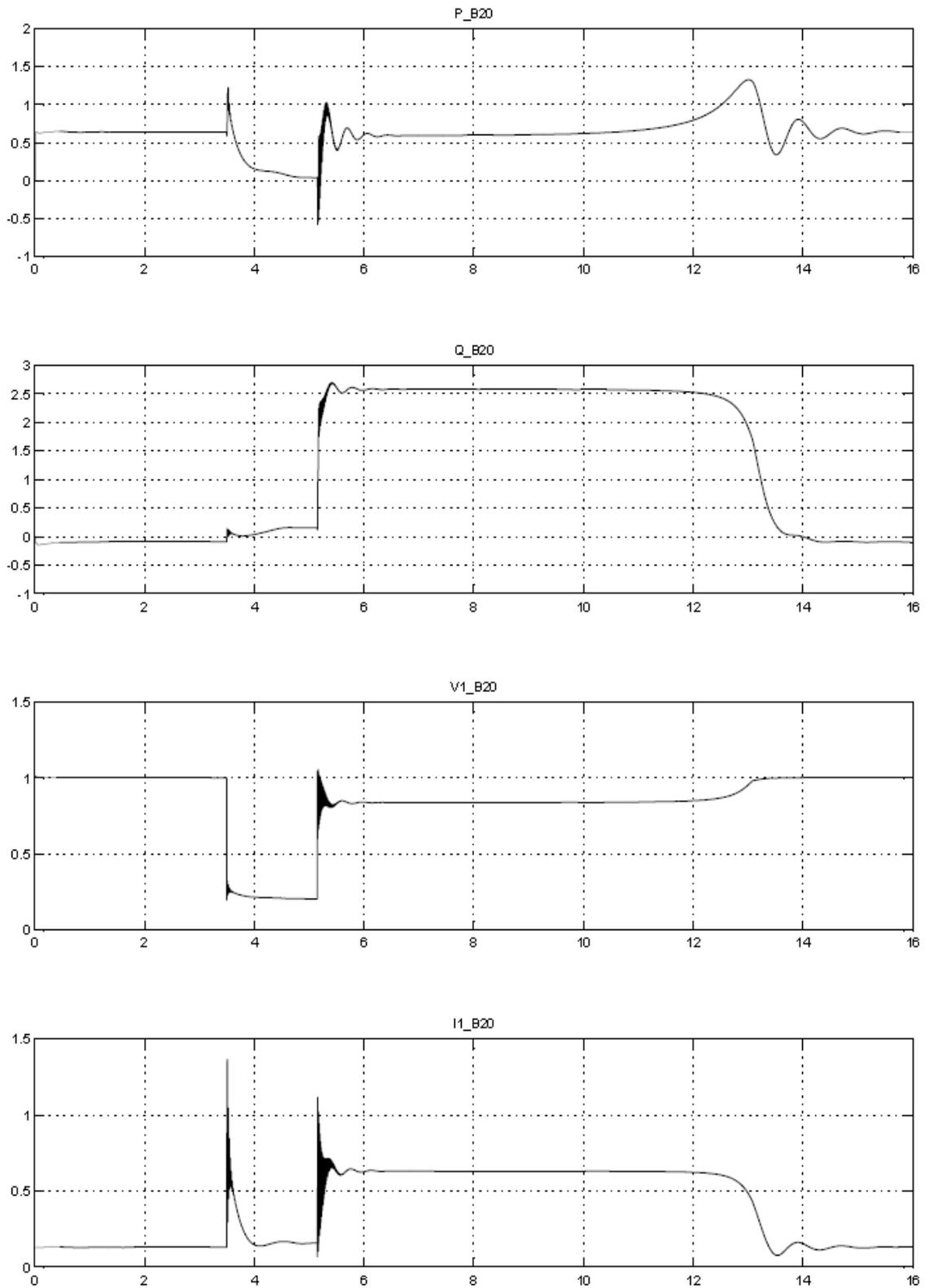
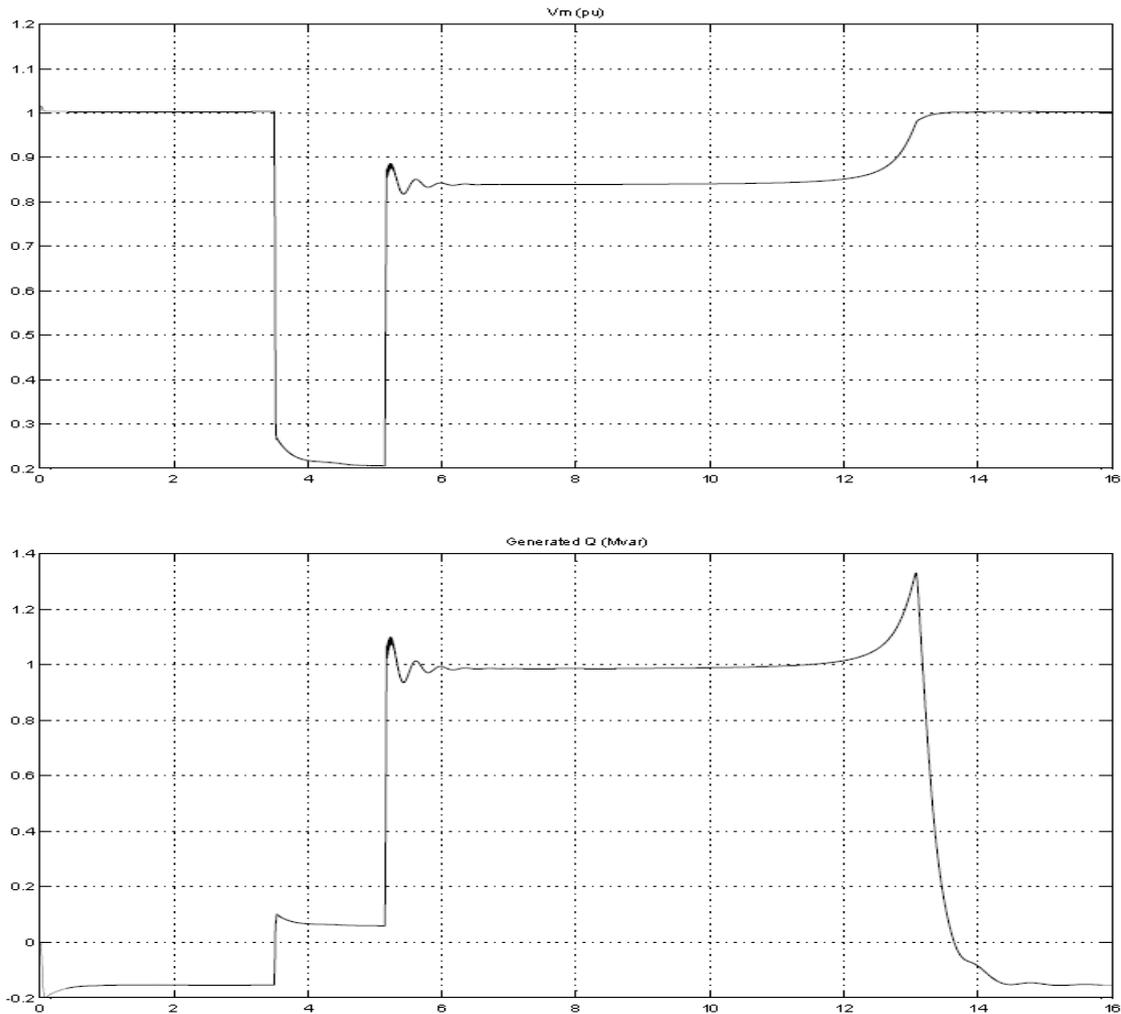


Figura 98.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 2.



**Figura 99.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 2.**

Cuando se baja la potencia que genera el aerogenerador y con la menor potencia de cortocircuito posible, se puede apreciar en la figura 97 que se mejora la estabilidad de la potencia reactiva durante la falta. La potencia activa tiene un comportamiento como el de las demás simulaciones con la potencia del aerogenerador de 0,65 MW y la velocidad de giro se acelera durante la falta para estabilizarse tan pronto como es posible.

En la figura 98 se tiene una evolución de potencia activa como la del nudo de 20 KV. La potencia reactiva durante la falta tiene una pequeña inyección de potencia, generando el resto cuando se despeja la falta hasta que se estabiliza. La tensión se estabiliza muy rápido hasta un valor por encima del 85% de la tensión nominal y la corriente tiene sus dos picos de tensión en la falta y el despeje, estabilizándose cuando se estabiliza todo el sistema.

En la primera gráfica de figura 99 se ve la tensión medida por el SVC y la potencia pequeña potencia reactiva que se inyecta en el momento de la falta, inyectando el resto cuando se eleva la tensión justo después del despeje de falta. Esta simulación cumple el P.O. 12.3.

### 4.3.3. Tercera simulación con compensador estático SVC.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	5,25	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,36	(s)

Tabla 25.- Parámetros tercera simulación con compensador estático SVC.

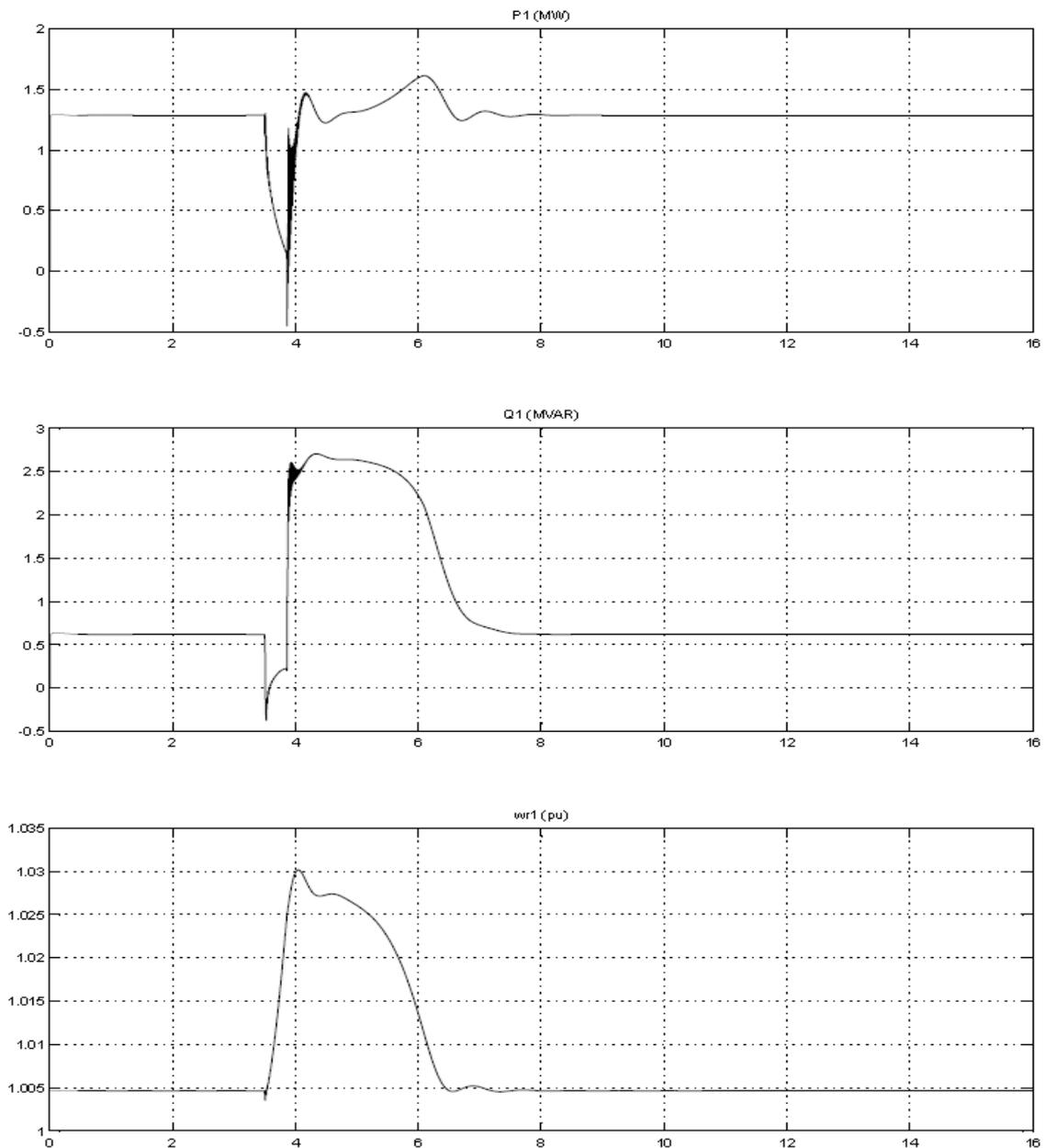


Figura 100.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 3.

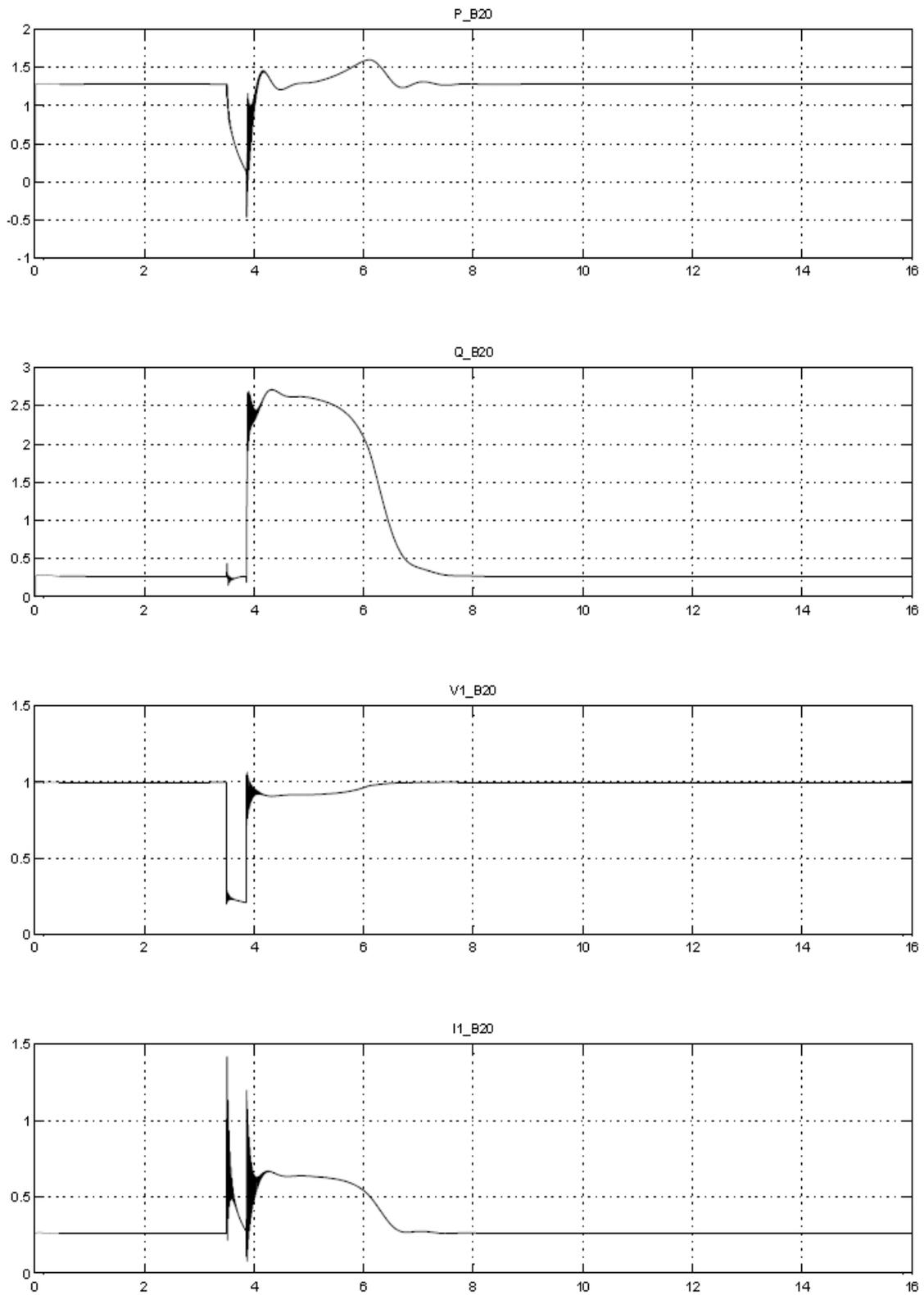
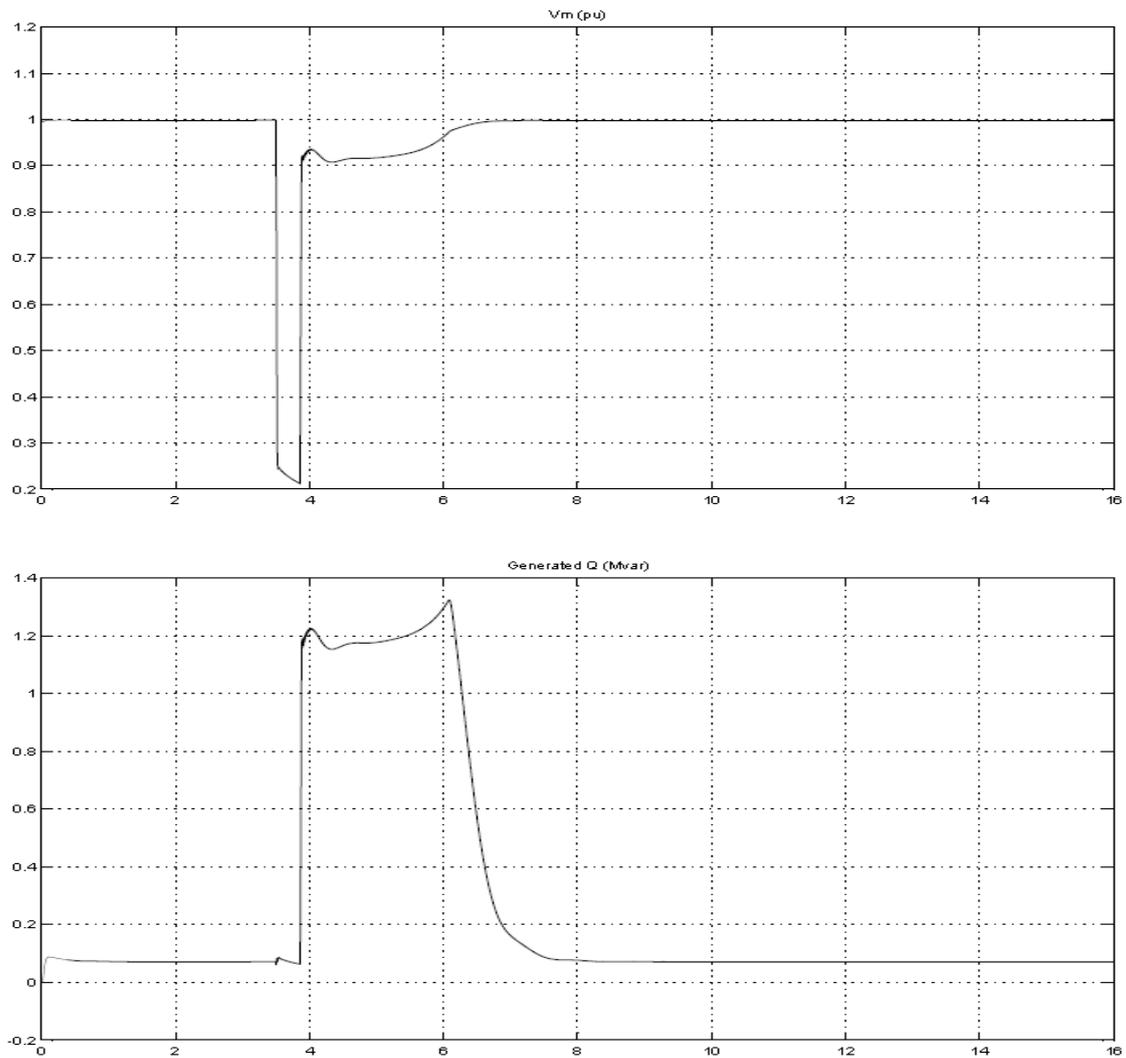


Figura 101.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 3.



**Figura 102.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 3.**

En la figura 100 el aerogenerador funciona casi a la potencia nominal y comparando todas las simulaciones anteriores de esta potencia, no se cumplen los tiempos de duración de la falta del P.O. 12.3. La evolución de la potencia activa tiene una caída en el momento de falta que se recupera en el despeje de la misma, al igual que la potencia reactiva. La velocidad de giro es más propensa a acelerarse debido al grado de funcionamiento de la máquina.

La figura 101 muestra la misma evolución de potencia activa que en el aerogenerador y la potencia reactiva tiene una caída muy pequeña durante la falta. La tensión en el nudo llega a un valor mayor al 90% de la tensión nominal dando unos excelentes resultados de recuperación de tensión. La corriente tiene dos picos de tensión tanto en la falta porque se deriva la corriente a tierra como en el despeje de falta estabilizándose cuando se estabiliza el aerogenerador.

La evolución de la tensión medida en el SVC se ve en la figura 102, al igual que el aporte de reactiva por el compensador estático. La inyección de potencia reactiva se ve limitada en la falta hasta que se despeja.

#### 4.3.4. Cuarta simulación con compensador estático SVC.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p. u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,002105	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	5,13	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,77	(s)

Tabla 26.- Parámetros cuarta simulación con compensador estático SVC.

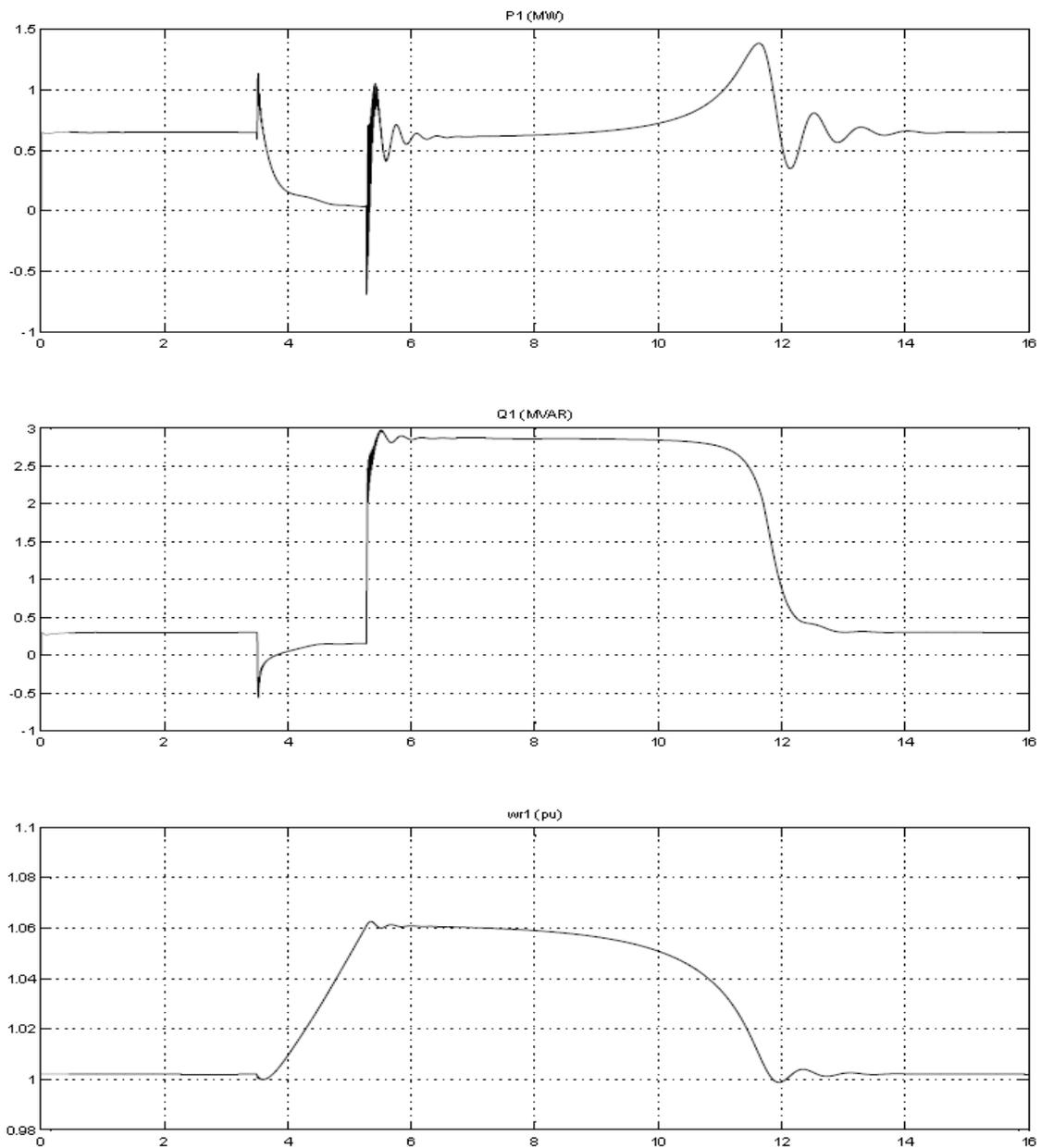


Figura 103.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con SVC, 4.

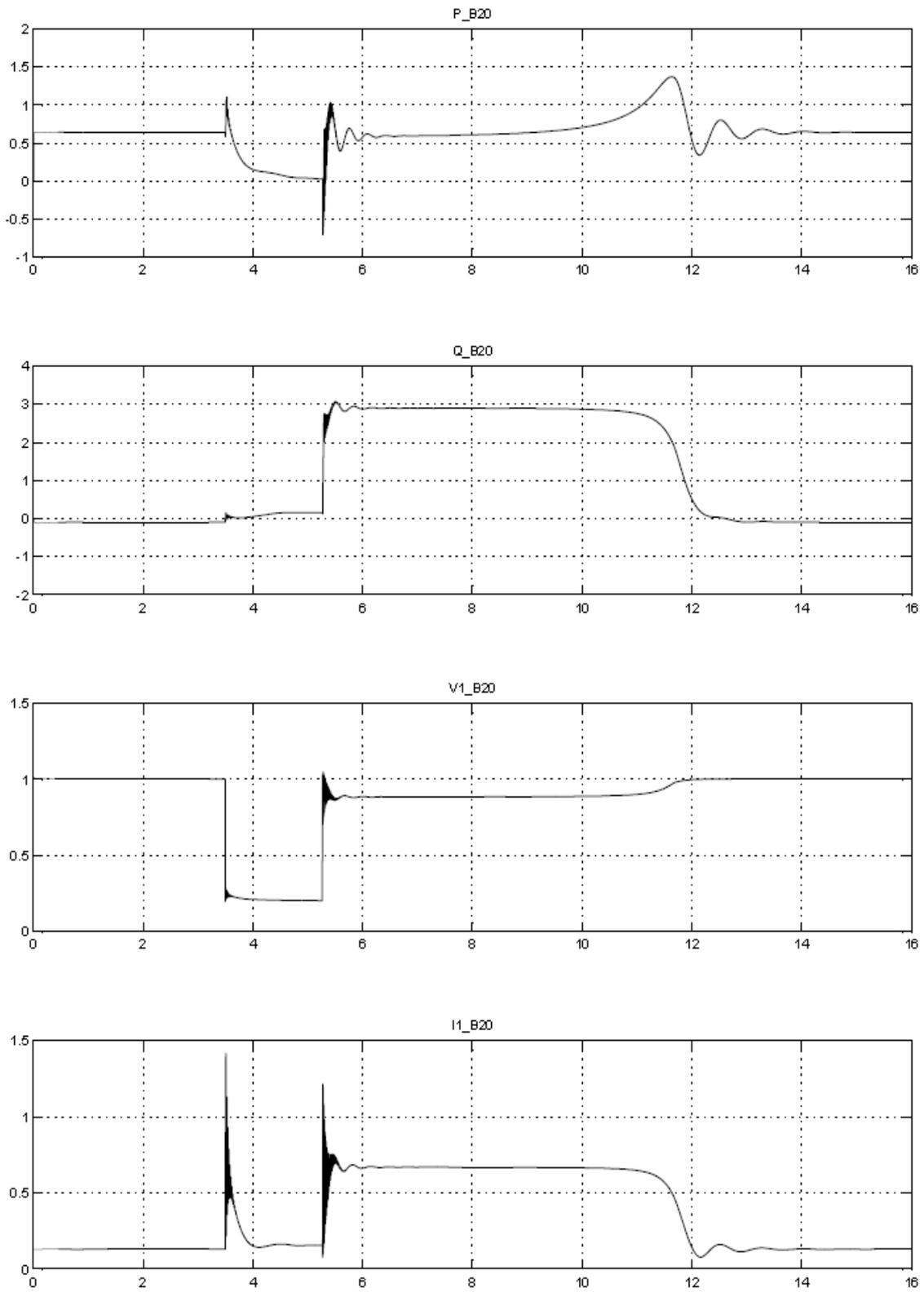
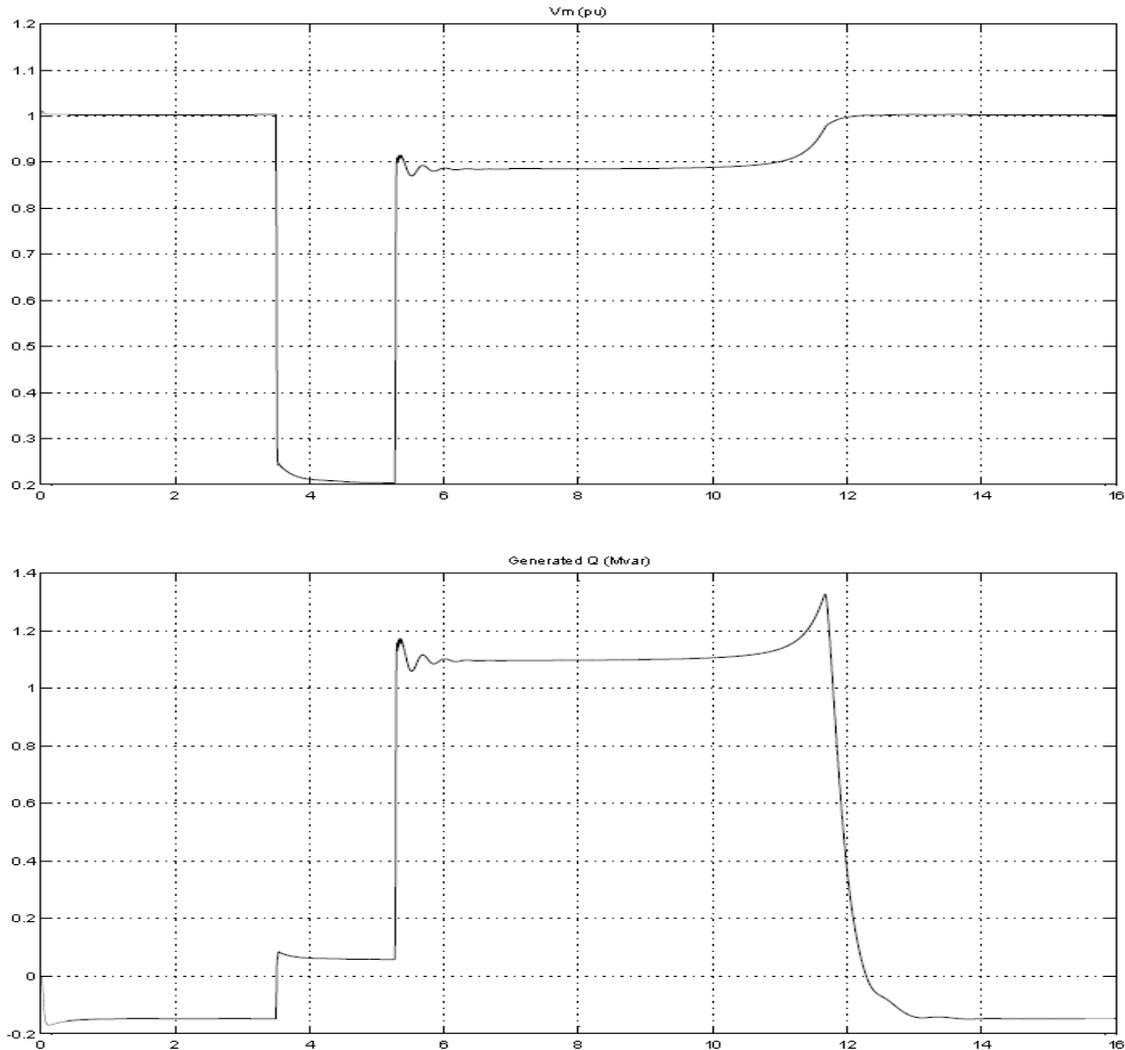


Figura 104.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con SVC, 4.



**Figura 105.- Evolución de tensión medida por el compensador SVC e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 4.**

La figura 103 muestra que en la potencia reactiva al igual que en absolutamente todas las simulaciones realizadas, se tiene una caída de potencia reactiva en la falta y se recupera rápidamente. La potencia reactiva tiene una leve caída que se ve subsanada por el compensador estático. La máquina se acelera de una forma más lenta al estar menos cargada y tener mayor potencia de cortocircuito.

La respuesta de las medidas de la figura 104 de potencia activa y reactiva reaccionan correctamente en la falta y después de ella, además la tensión se estabiliza de forma muy rápida, al igual que la corriente. Esta simulación cumple escrupulosamente el P.O. 12.3.

En la figura 105 se observa la inyección de potencia reactiva limitada por la tensión en el momento de la falta y tras el despeje de esta entrega toda su potencia reactiva para la rápida estabilización de la tensión en el nudo de 20 KV.

#### 4.3.5. Primera simulación con compensador estático STATCOM.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	7,95	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,34	(s)

Tabla 27.- Parámetros primera simulación con compensador estático STATCOM.

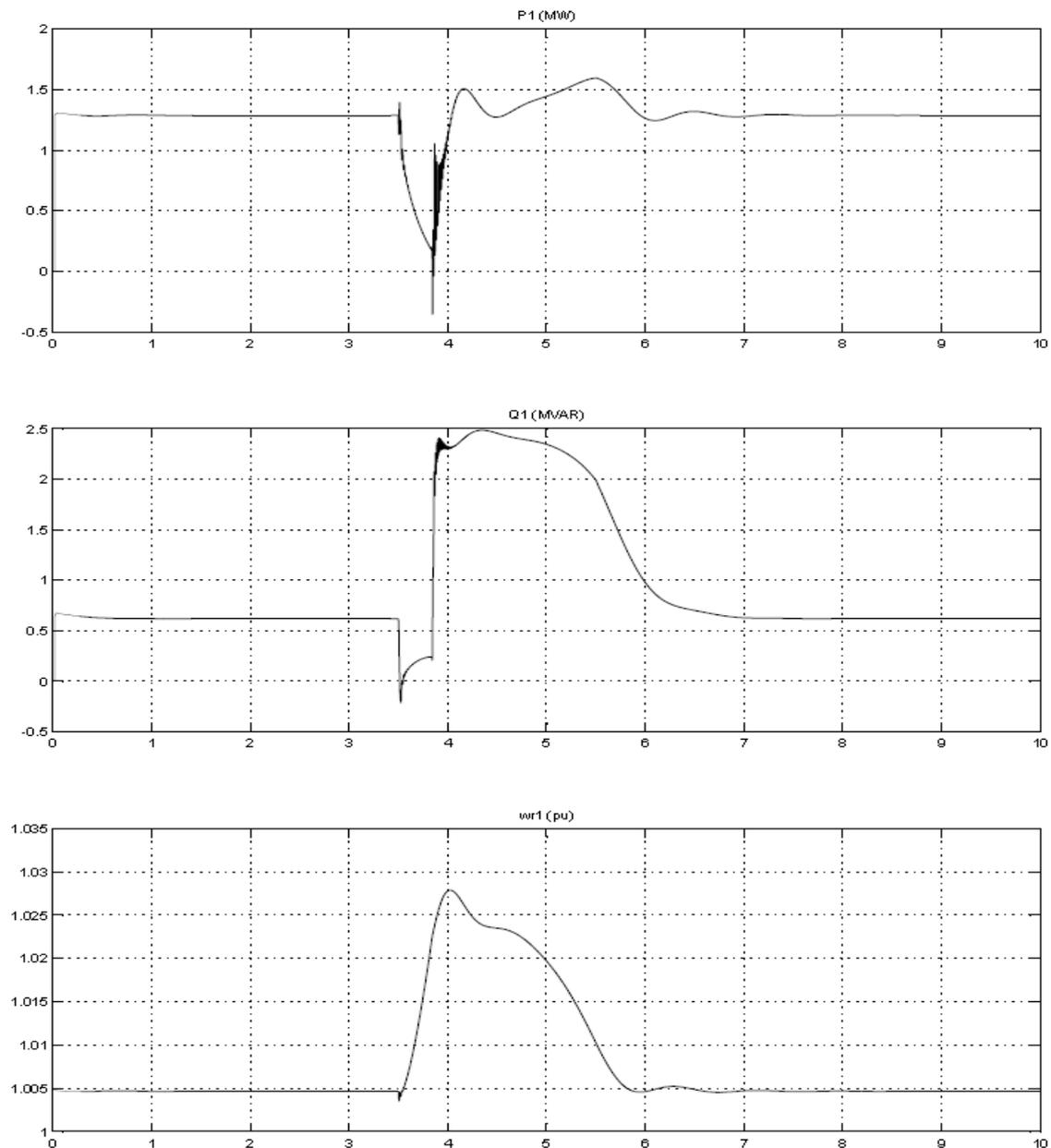


Figura 106.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 1.

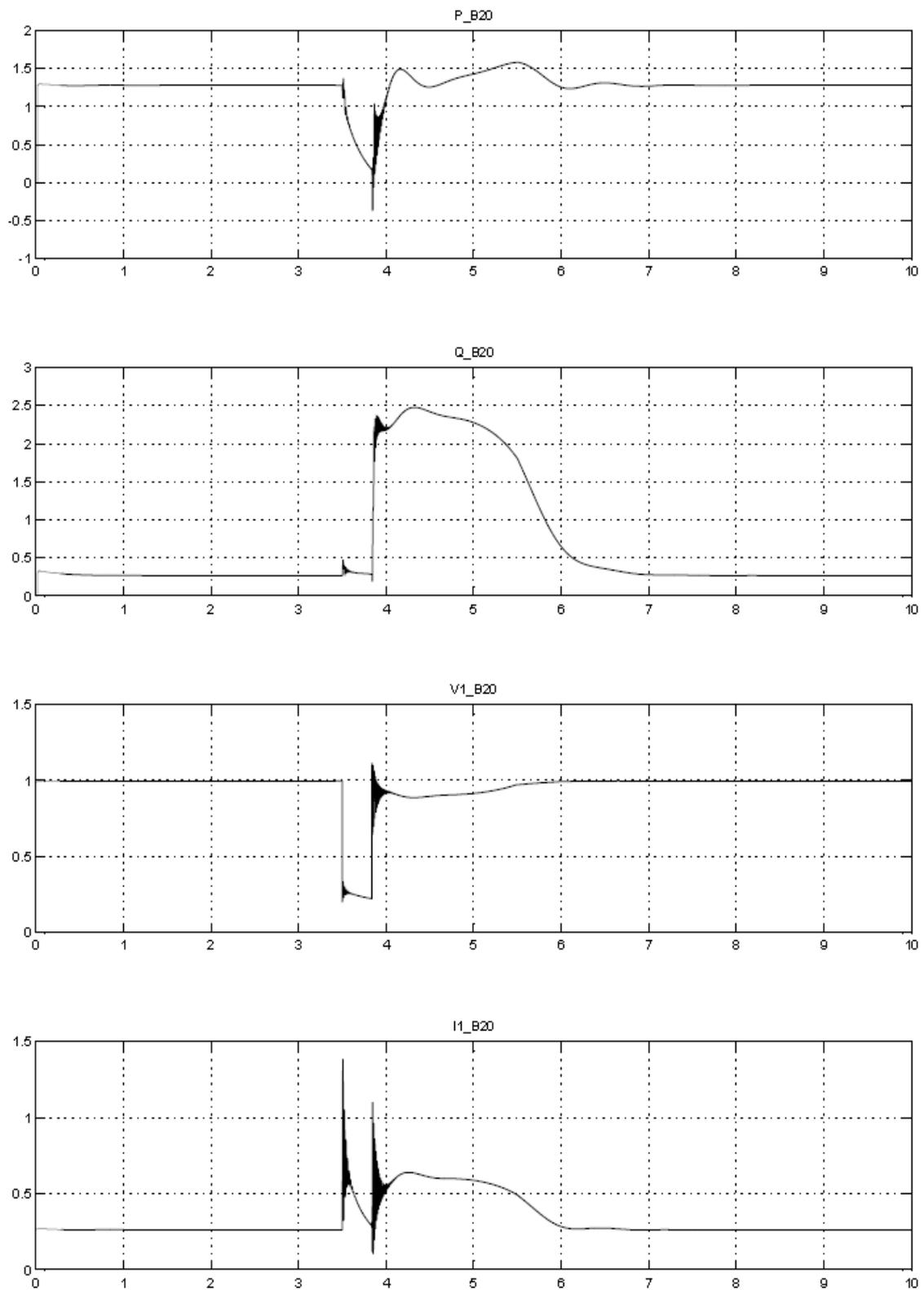
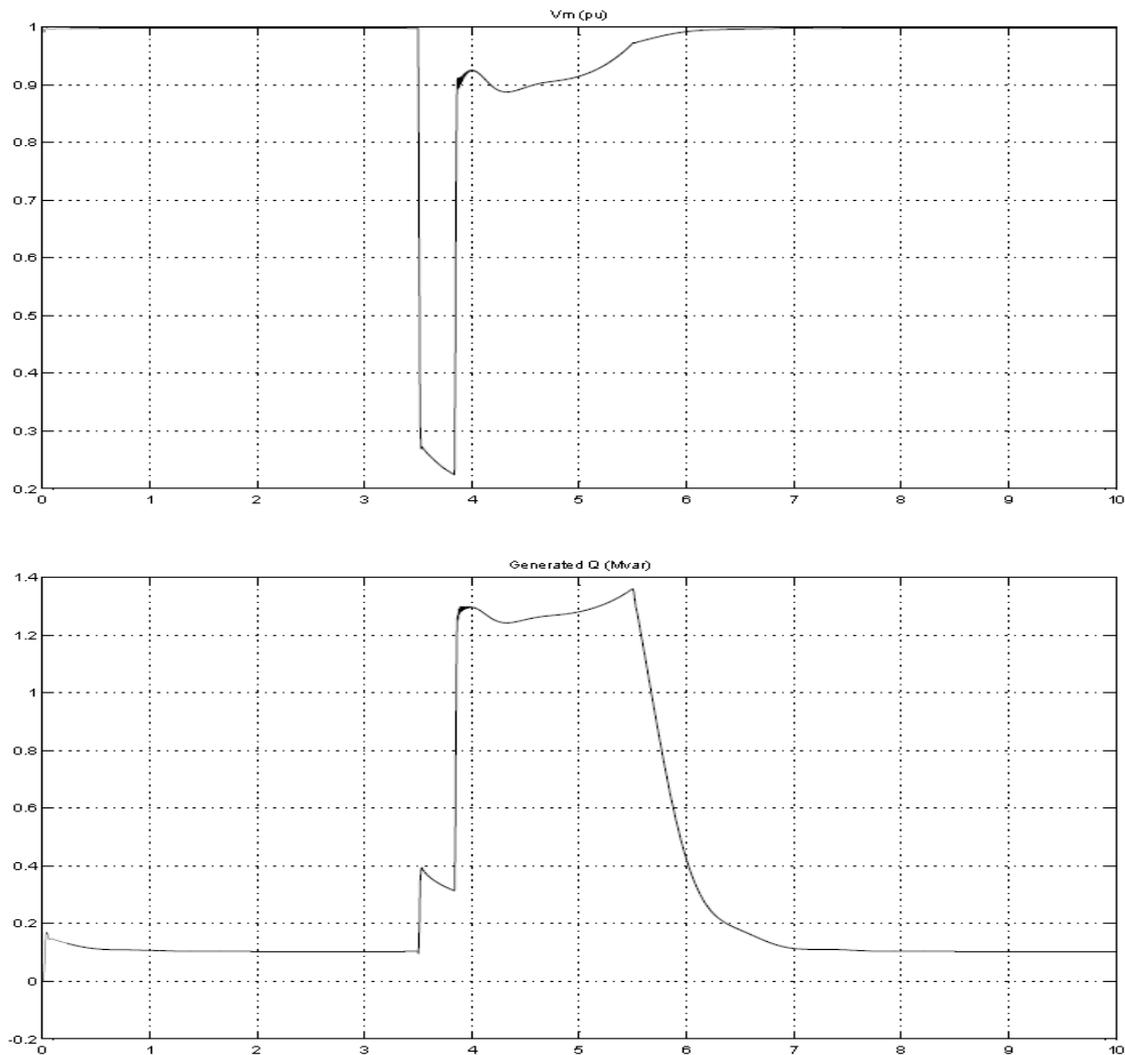


Figura 107.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 1.



**Figura 108.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 1.**

Se ve en la figura 106 como la potencia activa sigue teniendo la forma característica ante una falta trifásica. La potencia reactiva tiene una caída mínima debido a la capacidad de entregar potencia reactiva del compensador estático durante la falta y aumenta aún más el tiempo de cortocircuito respecto a la primera simulación con SVC, aunque sin llegar a cumplir los tiempos del P.O.12.3.

En la figura 107 se observa la evolución normal de la potencia activa y la evolución normal de la potencia reactiva, donde se aprecia que en la falta se inyecta potencia reactiva y no hay ninguna caída brusca de la misma. Respecto a la tensión llega casi hasta el 90 % en el caso más desfavorable, es decir, con menor potencia de cortocircuito y mayor grado de carga del aerogenerador.

Este tipo de compensadores en comparación con los SVC es capaz de aumentar la producción de energía reactiva durante el momento de falta y entregar toda la potencia después del despeje de falta como se aprecia en la figura 108.

#### 4.3.6. Segunda simulación con compensador estático STATCOM.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	28	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p. u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00205	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	7,69	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,70	(s)

Tabla 28.- Parámetros segunda simulación con compensador estático STATCOM.

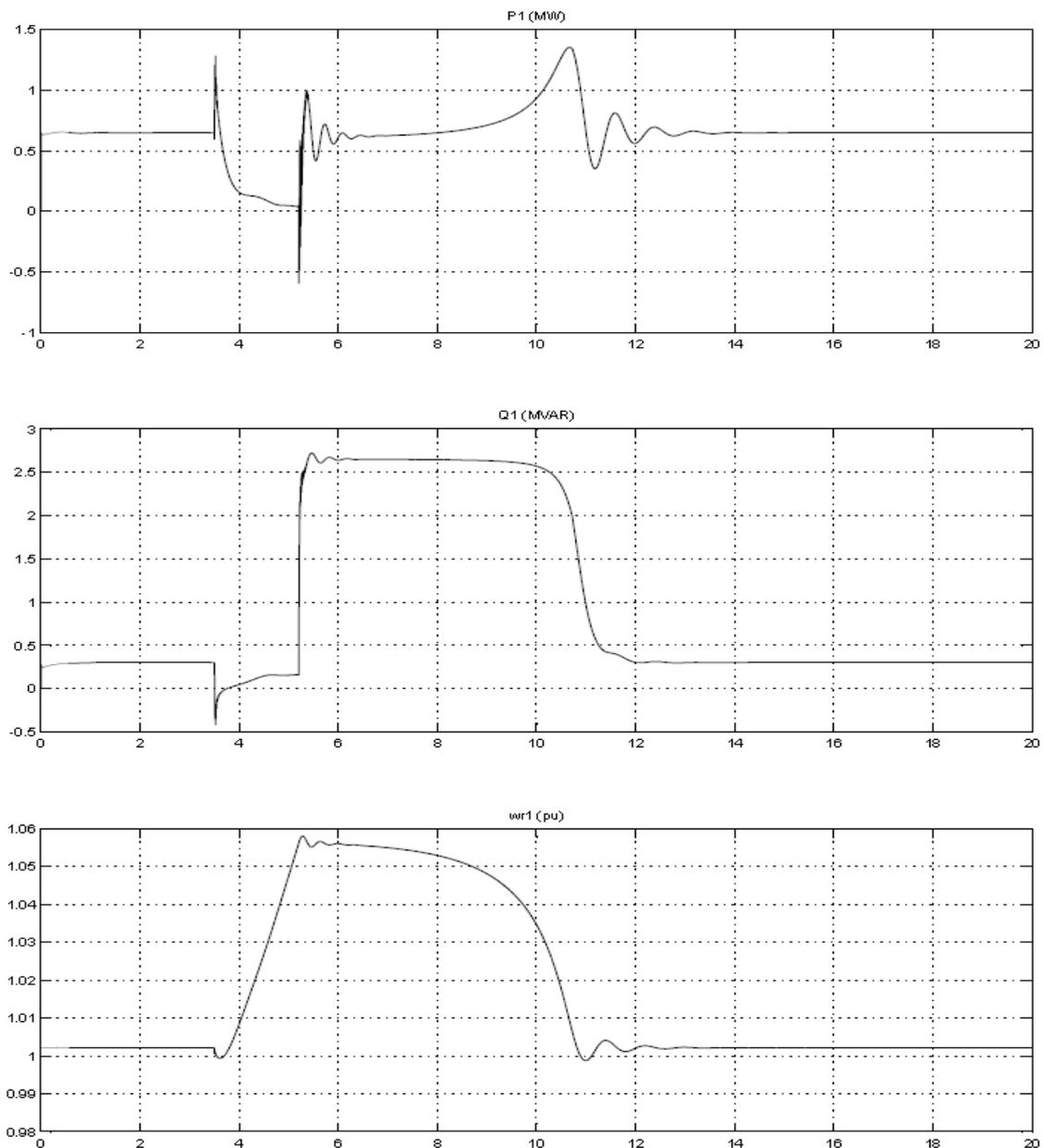


Figura 109.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 2.

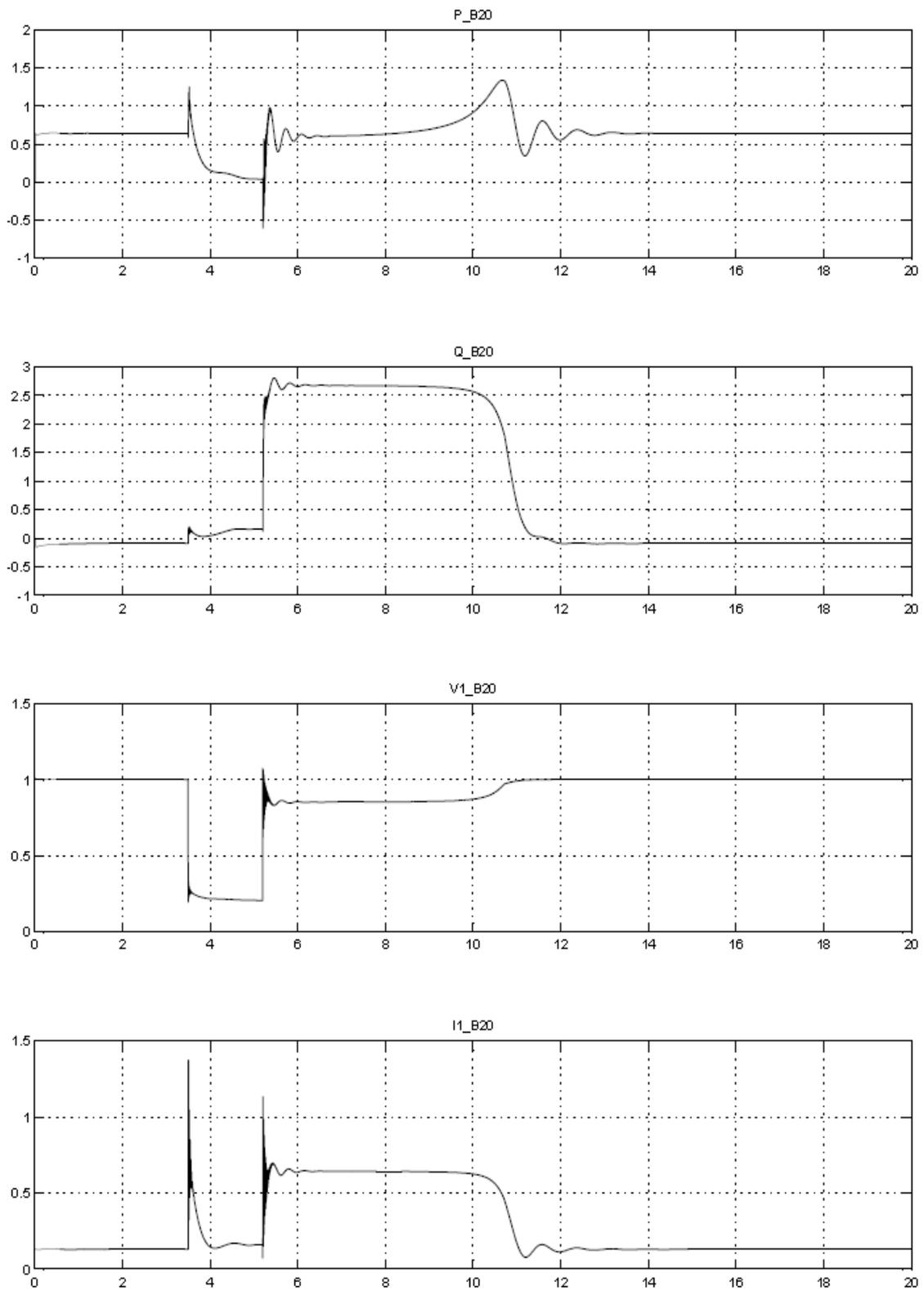
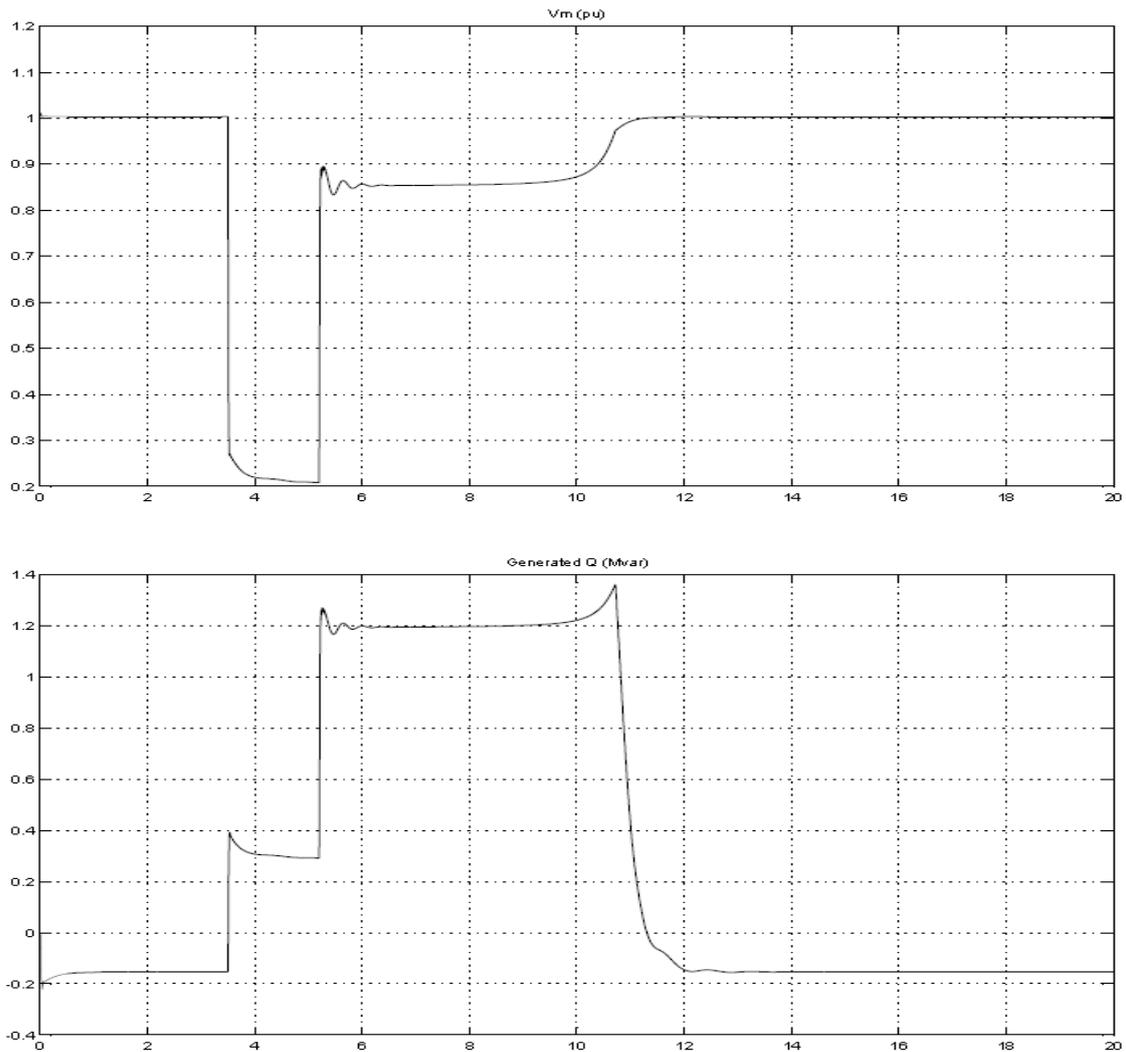


Figura 110.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 2.



**Figura 111.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 2.**

En este caso la figura 109 muestra la típica caída de potencia activa y su estabilización rápida. La potencia reactiva tiene una menor caída debido al porcentaje de generación que está funcionando el aerogenerador y en cuanto a la curva de giro del aerogenerador vemos que al estar menos cargado, tarda mucho más tiempo en acelerarse y perder la estabilidad.

La figura 110 muestra la evolución en el nudo de 20 KV donde la potencia activa es igual que en el aerogenerador y se tiene una mayor inyección de potencia reactiva durante la falta por el compensador estático STATCOM, la tensión se estabiliza muy rápido y la corriente se estabiliza cuando el generador se estabiliza teniendo sus dos picos de corriente característicos.

En la figura 111 se aprecia la tensión medida por el compensador estático que está acorde con la del nudo. En cuanto a la inyección de potencia reactiva entrega la mayor potencia que el SVC durante la falta y tras el despeje entrega el total de su capacidad.

En esta simulación se cumplen con creces todas las condiciones del P.O. 12.3.

### 4.3.7. Tercera simulación con compensador estático STATCOM.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	1,3	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,9241	(p. u.)
Velocidad del viento	14,34	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,00479	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	5,25	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	0,36	(s)

Tabla 29.- Parámetros tercera simulación con compensador estático STATCOM.

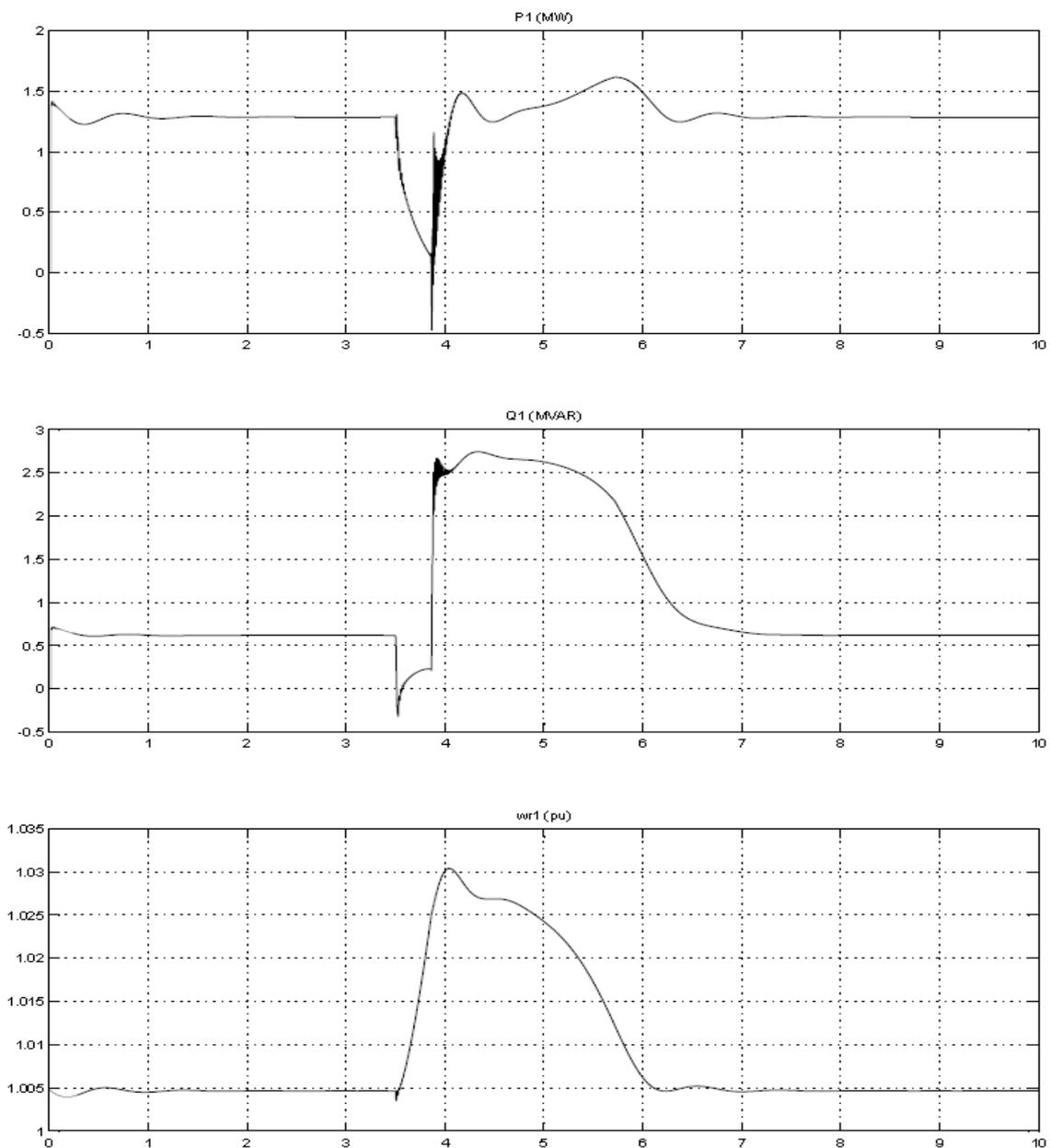


Figura 112.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 3.

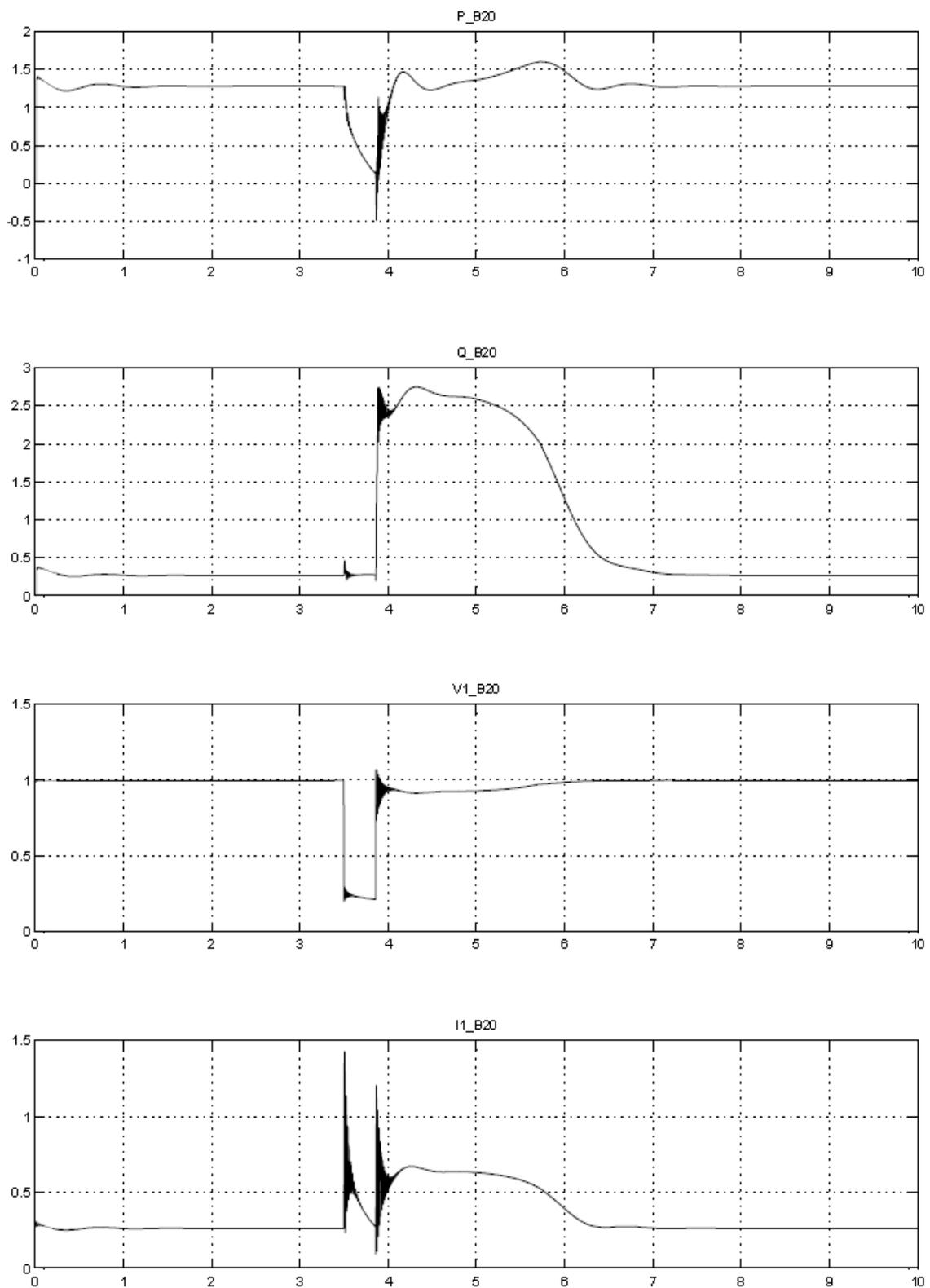
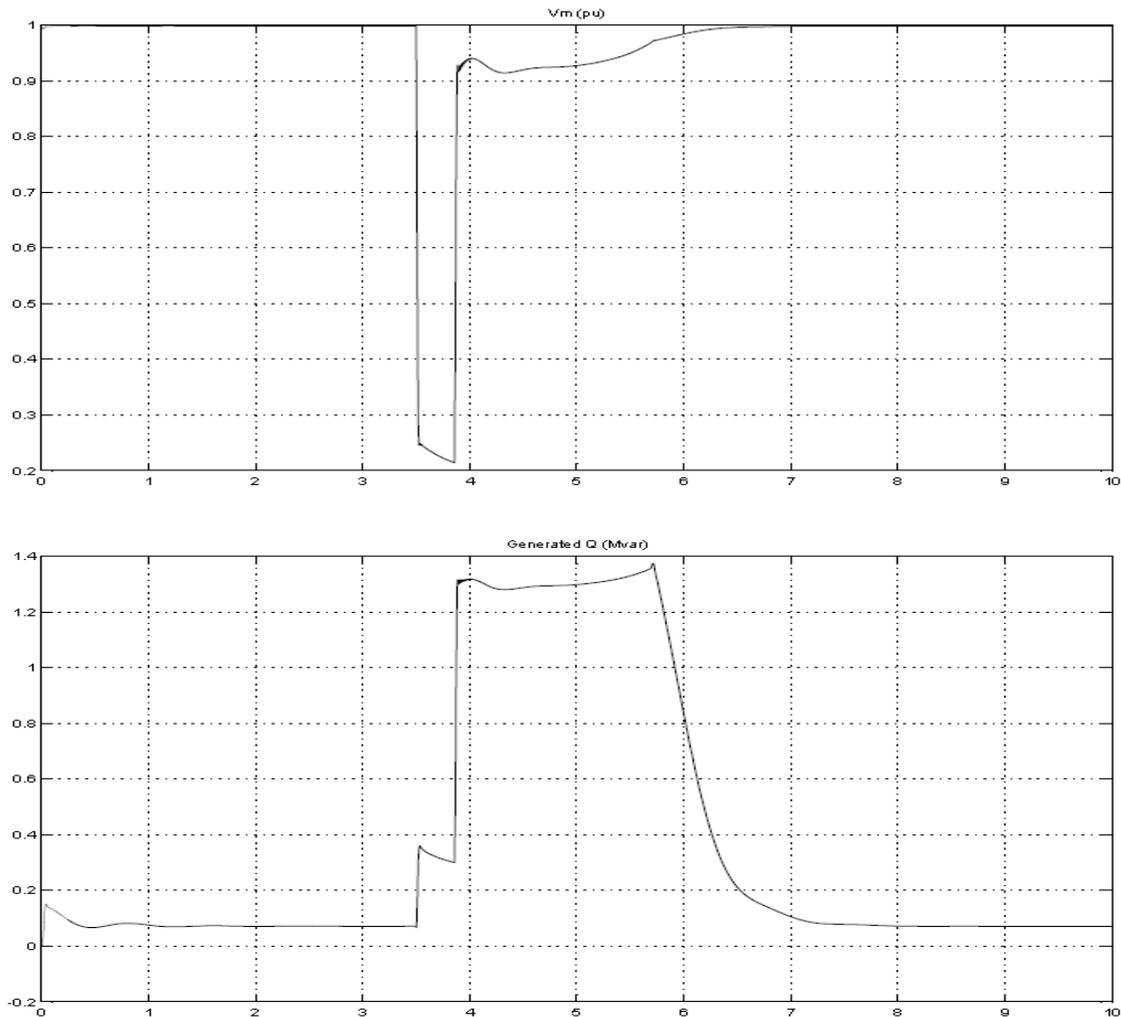


Figura 113.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 3.



**Figura 114.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 3.**

En esta simulación se cumplen todos los requisitos de tensión del P.O. 12.3. aunque no es capaz de mantener el aerogenerador estable cuando está funcionando a tensión nominal y se produce una falta de más de 0,36 segundos.

La evolución de la potencia activa es normal teniendo esta una caída en la falta que se recupera posteriormente. La potencia reactiva tiene una pequeña caída que se ve reducida por la acción de inyección del compensador estático durante la falta y la velocidad de giro es la normal y típica ante una falta trifásica. Todo esto se ve en la figura 112.

En la figura 113 se observa que la potencia activa es la misma que en el aerogenerador, que la potencia reactiva no tiene prácticamente caída por la inyección esta potencia y la tensión se recupera hasta casi un valor del 95% en el momento de despeje de falta. La corriente evoluciona como en todas las simulaciones.

El comportamiento del compensador estático muestra en la figura 114 la rápida estabilización de tensión tras el despeje de falta y la inyección de potencia reactiva durante la falta además de la inyección de toda la capacidad del compensador tras la falta.

#### 4.3.8. Cuarta simulación con compensador estático STATCOM.

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia de cortocircuito	150	(MVA)
Potencia generada por la máquina de inducción	0,65	(MW)
Par a introducir en la máquina de inducción	0,4633	(p. u.)
Velocidad del viento	9,45	(m/s)
Deslizamiento de la máquina	-0,002105	(p. u.)
Resistencia de falta/fase	5,13	( $\Omega$ )
Tiempo de duración del cortocircuito	1,81	(s)

Tabla 30.- Parámetros cuarta simulación con compensador estático STATCOM.

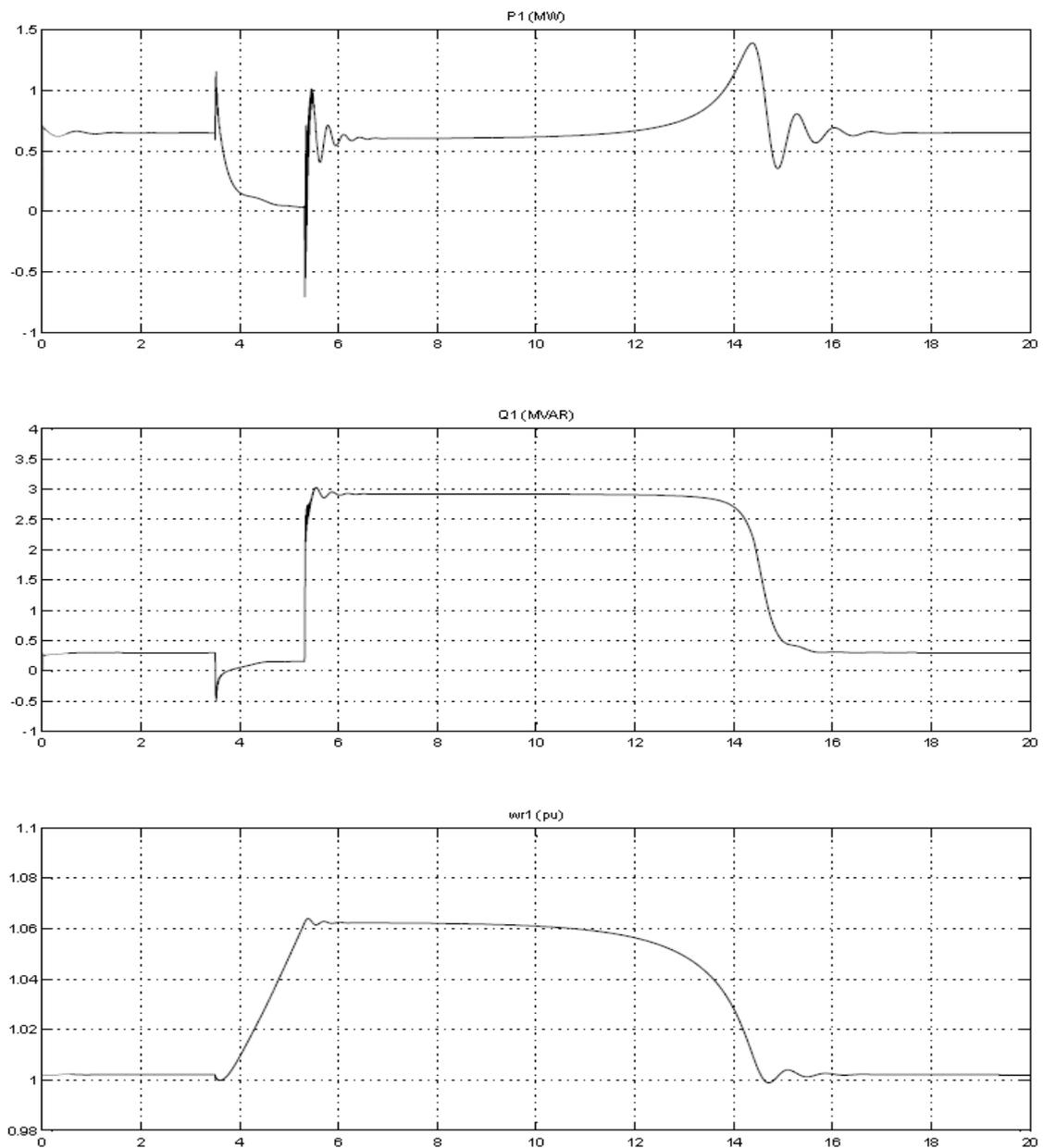


Figura 115.- Evolución de potencia activa, potencia reactiva y velocidad de la máquina de inducción con STATCOM, 4.

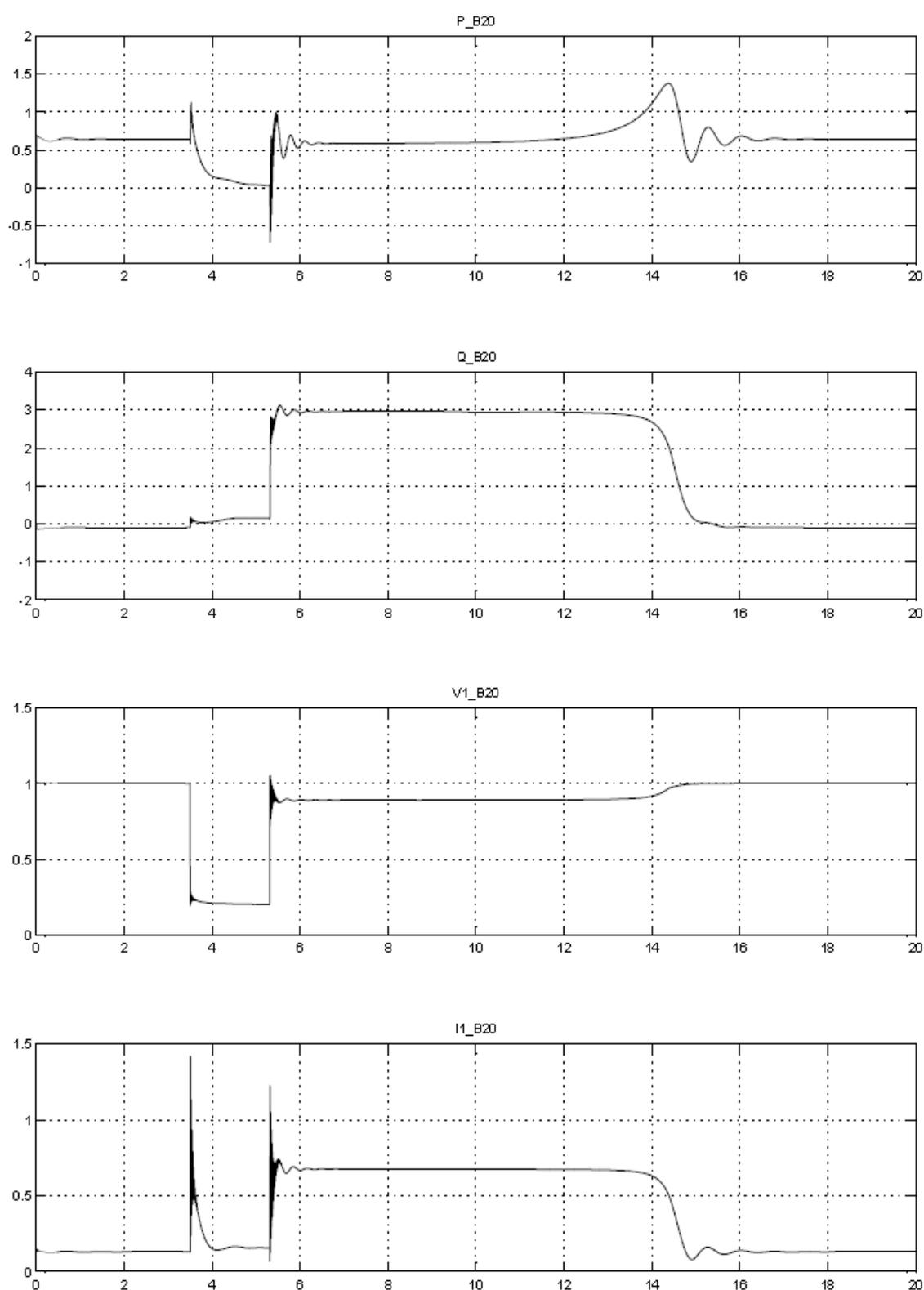
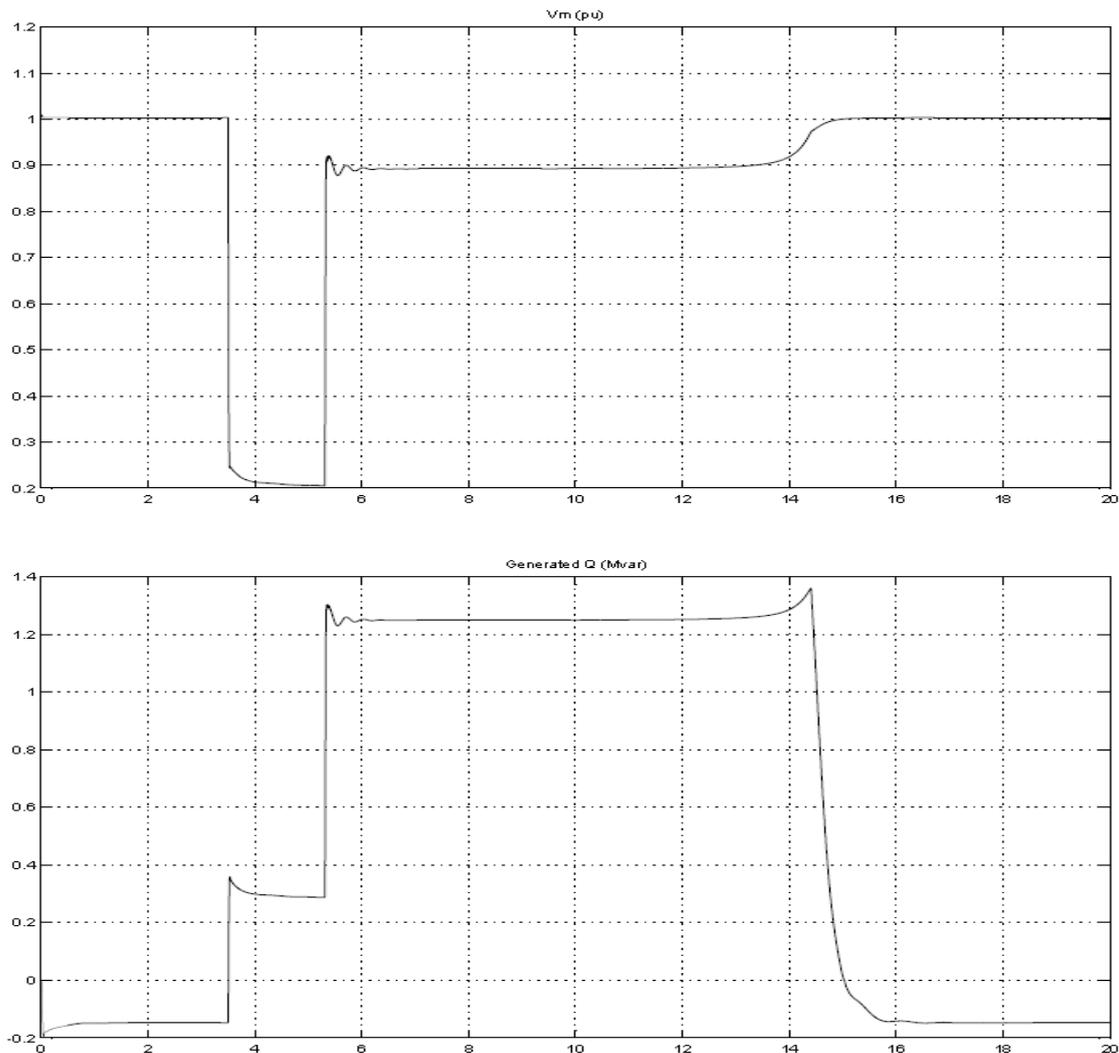


Figura 116.- Evolución de potencia activa (MW), potencia reactiva (MVar), tensión (p.u.) y corriente del nudo (p.u.) de 20KV con STATCOM, 4.



**Figura 117.- Evolución de tensión medida por el compensador STATCOM e inyección de potencia reactiva en punto de conexión, 4.**

En la última simulación se dan las mejores condiciones ante la falta trifásica de entre todas las simulaciones realizadas, cumpliendo el procedimiento de operación 12.3. en todos los aspectos con creces.

En la figura 115 se observa como la potencia activa sufre una caída en el momento que se produce la falta trifásica y se recupera muy rápido teniendo unas pequeñas oscilaciones antes de su total estabilización. La potencia reactiva tiene una leve caída en el momento de la falta y tras el despeje de falta se genera un consumo elevado para estabilizar la tensión. En cuanto a la velocidad de giro de la máquina se ve que tarda mucho más tiempo en llegar a la inestabilidad.

La figura 116 muestra la evolución de la potencia activa de la figura 115 y además también muestra en la evolución de la potencia reactiva una inyección durante la falta producida por el compensador STATCOM. En cuanto a la tensión llega a unos valores de recuperación del 90% tras el despeje de falta y la corriente tiene sus dos picos de corriente en la falta y el despeje así como su tiempo de estabilización total cuando se alcanza la estabilidad.

La figura 117 muestra una respuesta muy buena de tensión ante una falta trifásica y también muestra el comportamiento de inyección de reactiva del compensador estático STATCOM en esas circunstancias, observando el mismo comportamiento que en las simulaciones anteriores con STATCOM.

## **5. Conclusiones.**

Tras la construcción de los modelos y la realización de las simulaciones se han podido deducir los comportamientos de los aerogeneradores de inducción con rotor en jaula de ardilla cuando se produce una falta trifásica en el punto de conexión del aerogenerador a la red.

En primer lugar se ha tratado la estabilidad del aerogenerador, observando que en las simulaciones sin compensadores estáticos se reduce mucho la estabilidad del aerogenerador debido a que este tiende a acelerarse más rápido que cuando se utilizan compensadores estáticos. Cuando se hace uso de los compensadores estáticos SVC y STATCOM la estabilidad del sistema se ve mejorada. Además hay que destacar que durante la falta se comporta mejor el STATCOM porque es capaz de inyectar más potencia reactiva y aumentar más rápido la tensión en el punto de conexión que el SVC.

Otro aspecto muy importante que afecta a la estabilidad del aerogenerador es la cantidad de potencia que está generando la máquina, donde se ha llegado a la conclusión de que cuanto más potencia se produce por el aerogenerador, este tarda menos en acelerarse ante una falta trifásica y si se produce menor potencia por el aerogenerador, tiende a ser mucho más estable.

Sobre los huecos de tensión, se han forzado en las simulaciones a estar en límite establecido en el P.O. 12.3. a través de la resistencia de falta. En las simulaciones sin compensadores la resistencias de falta tienen que ser mayores que en las simulaciones con compensadores estáticos, como se puede observar desde la tabla 14 hasta la tabla 30, para evitar las grandes corrientes y bajas tensiones debido a que no tenemos más inyección de potencia reactiva que la que nos proporciona el banco de condensadores a la salida del aerogenerador.

Cuando se incluyen los compensadores estáticos en las simulaciones es posible ver como aumenta la capacidad del hueco de tensión a través de la disminución de la resistencia de falta. Si ahora se hace la comparación entre los compensadores estáticos SVC y STATCOM se puede ver en las figuras de las simulaciones con STATCOM como se recupera mejor la tensión que en las figuras de las simulaciones con SVC, ya que el aporte de potencia reactiva se ve limitado por la tensión de la falta.

Por tanto cuanto mayor resistencia de falta tengamos mejor se va a comportar el sistema teniendo menores caídas de tensión y menores valores de corriente producida por el cortocircuito.

Para finalizar es necesario decir que la potencia de cortocircuito es un parámetro importantísimo en una red. En todas las simulaciones se ha apreciado que cuando se tiene la potencia de cortocircuito de red mínima necesaria para la conexión con este aerogenerador, que es de 28 MVA, la tensión tarda mucho más en estabilizarse y por tanto el aerogenerador se acelera más rápido ante una falta y tiene que haber resistencias de falta más grandes para que la tensión no baje del límite de 0,2 p.u.

En definitiva, tanto la aceleración del aerogenerador como la tensión en el nudo de conexión del aerogenerador será mejor cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito, así como también será mejor la recuperación de la tensión tras el despeje de las faltas trifásicas, reflejado en las figuras de tensión del nudo de 20 kV de todas las simulaciones.

## **6. Bibliografía.**

- [CHI] Chinchilla Sánchez M., "Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador síncrono Multipolar de imanes permanentes acoplado a red" Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés 2001.
- [FRA] Fraile Mora J., "Máquinas Eléctricas", Mc Graw Hill, Madrid 2003.
- [HIN]; [GYU] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press book, 2000.
- [KRA] Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, 2002.
- [KUN] P. Kundur, "Power system stability and control", Electric Power Research Institute, 1994.
- [MOH]; [UND]; [ROB] Mohan, N., T.M. Undeland, and W.P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York 1995.
- Web Gamesa: <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/madeae611320kw.html>
- Web Red Eléctrica de España: [http://www.ree.es/operacion/operacion\\_sistema.asp](http://www.ree.es/operacion/operacion_sistema.asp)

## 7. Anexos.

### 7.1. ANEXO A.1

Procedimiento de operación 12.3. "Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas".

Tercero.-La presente Resolución surtirá efectos el día siguiente al de su publicación en el Boletín Oficial del Estado.

Madrid, 4 de octubre de 2006.-El Secretario General de Energía, Ignasi Nieto Magaldi.

#### ANEXO

#### PO. 12.3. Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas

1. *Objeto.*-El presente procedimiento de operación establece los requisitos que han de cumplir las distintas instalaciones de producción en régimen especial a efectos de garantizar la continuidad de suministro frente a huecos de tensión, en cumplimiento de lo establecido en la disposición adicional cuarta del Real Decreto 436/2004.

2. *Ámbito de Aplicación.*-Instalaciones de generación en régimen especial que utilicen la energía eólica como fuente exclusiva de energía primaria (grupo b.2 del Real Decreto 436/2004).

Este procedimiento se aplicará a los nuevos parques eólicos que se conecten al sistema eléctrico y cuya fecha de inscripción definitiva en el Registro administrativo de instalaciones de producción de régimen especial, dependiente del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, sea posterior a 1 de enero de 2007. El resto de instalaciones dispondrá de los periodos transitorios de adaptación que en cada momento se establezcan en la legislación vigente.

En el caso instalaciones existentes que por su configuración técnica les fuera imposible acreditar el cumplimiento de los requerimientos mínimos previstos en este procedimiento de operación, sus titulares deberán presentar ante el Operador del Sistema, en el plazo transitorio que les corresponda, una memoria justificativa de dicha imposibilidad técnica, impidiéndose con ello el devengo del incentivo económico.

3. *Definiciones.*-Punto de conexión a red: Nudo de la Red de Transporte o de la Red de Distribución donde se evacua la producción de la instalación de generación.

Cortocircuito correctamente despejado: Se considera que un cortocircuito en el sistema eléctrico ha sido correctamente despejado cuando la actuación de los sistemas de protección ha sido acorde con los criterios establecidos en el procedimiento de operación 11.1 «Criterios generales de protección de la red gestionada».

Periodo de falta: Tiempo comprendido entre el inicio de un cortocircuito -con caída de la tensión por debajo de 0,85 p.u.- en el sistema eléctrico y el instante en el que dicho cortocircuito es despejado por la actuación de los sistemas de protección previstos a estos efectos.

Hueco de Tensión: Un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión seguida de su restablecimiento después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 minuto.

Periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la falta: Tiempo comprendido entre el instante de despeje de la falta y el instante en el que la tensión en el punto de conexión a red pasa a estar de nuevo comprendida dentro de los límites admisibles de variación establecidos para la operación normal del sistema eléctrico e indicados en el procedimiento de operación 1.4 «Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema» o se alcanza el límite de tiempo establecido en la figura 4.1.

4. *Respuesta frente a cortocircuitos.*-El titular de la instalación deberá adoptar las medidas de diseño y/o control necesarias para que todas las instalaciones de generación bajo su titularidad que estén incluidas en el ámbito de aplicación del presente procedimiento, se mantengan acopladas al sistema eléctrico, sin sufrir desconexión por causa de los huecos de tensión directamente asociados a

## MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

**18485** RESOLUCIÓN de 4 de octubre de 2006, de la Secretaría General de Energía, por la que se aprueba el procedimiento de operación 12.3 Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas.

Vista la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.

Visto el Real Decreto 2019/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el mercado de producción de energía eléctrica.

Vista la propuesta realizada por el Operador del Sistema del procedimiento de operación del sistema, PO. 12.3, de acuerdo con lo establecido en el artículo 31 del Real Decreto 2019/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el mercado de producción de energía eléctrica.

Esta Secretaría General, previo informe de la Comisión Nacional de Energía, ha adoptado la presente resolución:

Primero.-Se aprueba el procedimiento de operación PO. 12.3 «Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas», que figura como anexo de la presente resolución.

Segundo.-Al objeto de verificar el cumplimiento de los requisitos especificados en este procedimiento de operación, se desarrollará un sistema de certificación de acuerdo con lo previsto en el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial.

punto de conexión a red, la instalación deberá generar potencia reactiva, mientras que para tensiones comprendidas entre 0,85 pu y el valor de la tensión mínima admisible para la operación normal del sistema eléctrico, la instala-

ción no deberá consumir potencia reactiva. Para valores de tensión superiores a la tensión mínima admisible en operación normal aplicará lo establecido en los procedimientos de operación para dicha operación normal.

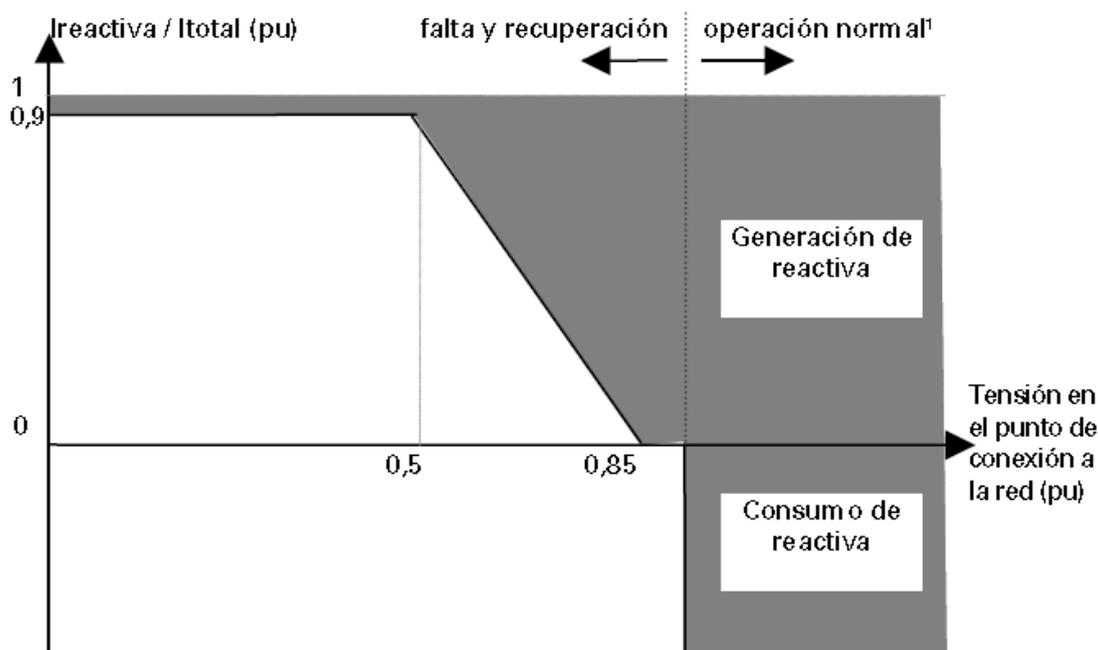


Figura 4.2. Área de funcionamiento admisible durante los periodos de falta y de recuperación de tensión, en función de la tensión en el punto de conexión a red.

<sup>1</sup> De acuerdo con el procedimiento de operación 1.4 «Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema».

4.2 Faltas desequilibradas (monofásicas y bifásicas): Tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia reactiva por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, se admiten consumos puntuales de potencia reactiva durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma. Adicionalmente se permiten consumos transitorios durante el resto de la falta siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

El consumo neto de energía reactiva<sup>2</sup> de la instalación no deberá ser superior a la energía reactiva equivalente al 40% de la potencia nominal registrada de la instalación durante un periodo de 100 ms.

El consumo neto de potencia reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 40% de su potencia nominal registrada.

<sup>2</sup> Los consumos referidos corresponden al total acumulado de las tres fases.

De forma paralela, tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia activa por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, en este caso se admite igualmente la existencia de consumos puntuales de potencia activa durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma.

Durante el resto del periodo de mantenimiento de la falta, se admiten consumos de potencia activa, siempre que cuando se cumplan las siguientes condiciones:

El consumo neto de energía activa<sup>3</sup> no deberá ser superior a la energía activa equivalente al 45% de la potencia nominal registrada de la instalación durante un periodo de 100 ms.

El consumo de potencia activa, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 30% de su potencia nominal registrada.

Las instalaciones existentes a la fecha de inicio de aplicación de este procedimiento estarán exentas del cumplimiento de los requisitos relativos a los consumos de potencia activa y reactiva durante faltas desequilibradas, establecidos en este apartado 4.2, salvo en el caso de que en la instalación se lleven a cabo importantes actuaciones de renovación y mejora.

<sup>3</sup> Los consumos referidos corresponden al total acumulado de las tres fases.

la existencia de cortocircuitos correctamente despejados que puedan presentarse en el sistema eléctrico.

La propia instalación de producción y todos sus componentes deberán ser capaces de soportar sin desconexión huecos de tensión, en el punto de conexión a red, producidos por cortocircuitos trifásicos, bifásicos a tierra o monofásicos, con los perfiles de magnitud y duración indicados en la figura 4.1. Es decir, no se producirá la desconexión de la instalación para huecos de tensión en el

punto de conexión a red incluidos en el área sombreada de la mencionada figura 4.1.

En el caso de cortocircuitos bifásicos aislados de tierra, el área sombreada de hueco de tensión en la que no se deberá producir la desconexión de la instalación será de forma semejante a la de la figura 4.1, pero estando situado el valor del límite inferior de tensión en 0,6 pu, en lugar de en 0,2 pu.

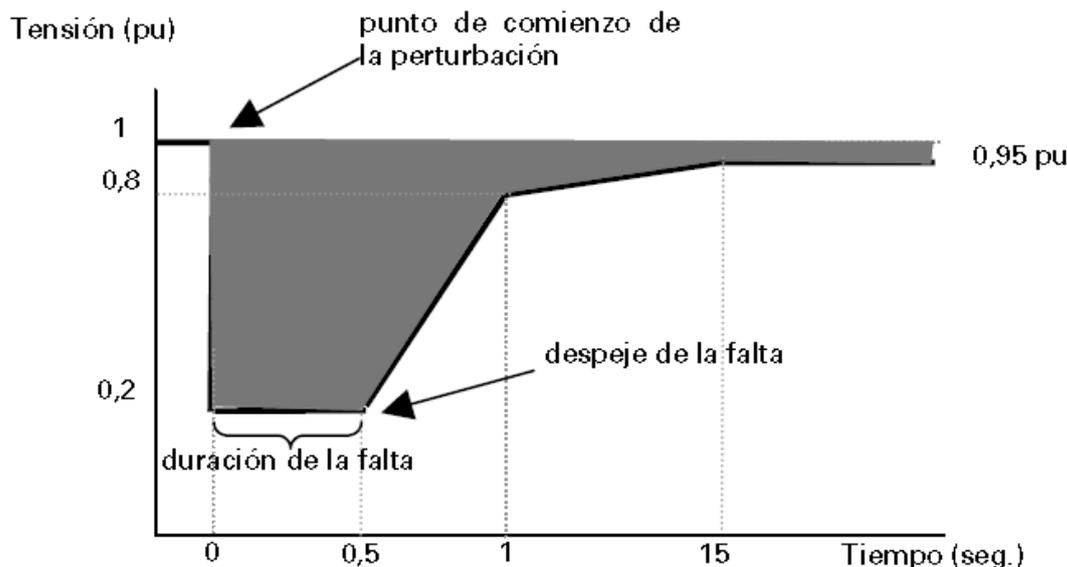


Figura 4.1 Curva tensión-tiempo<sup>1</sup> que define el área del «hueco de tensión» en el punto de conexión a red que debe ser soportado por la instalación. Tensión fase-tierra correspondiente a las fases en falta.

<sup>1</sup> Tensión por unidad: valor en tanto por uno respecto de la tensión nominal del Sistema.

Los tiempos de recuperación del sistema eléctrico representado en la figura 4.1, se verifican, con carácter general, para una producción de origen eólico inferior al 5% de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión. En el caso de aumentarse esta limitación de producción eólica, la curva de la figura 4.1 deberá modificarse de tal forma que las instalaciones de generación eólica soporten huecos de tensión de mayor profundidad.

4.1 Faltas equilibradas (trifásicas): Tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia reactiva por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, se admiten consumos puntuales de potencia reactiva durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma, y ello, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

Durante un periodo de 150 ms desde que se produce la falta, el consumo neto de potencia reactiva de la instala-

ción, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 60% de su potencia nominal registrada.

Durante los primeros 150 ms desde que se despeja la falta, el consumo neto de energía reactiva no deberá ser superior al 60% de su potencia nominal y el consumo neto de intensidad reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior a 1,5 veces la intensidad correspondiente a su potencia nominal registrada.

De forma paralela, tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia activa por parte de la instalación.

No obstante lo anterior, en este caso se admite también la existencia de consumos puntuales de potencia activa durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma. Adicionalmente se permiten consumos de potencia activa durante el resto de la falta, siempre que no sean superiores al 10% de su potencia nominal registrada.

Tanto durante el periodo de falta como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, la instalación deberá aportar al sistema eléctrico la máxima intensidad posible (I<sub>total</sub>).

Esta aportación de intensidad por parte de la instalación al sistema eléctrico se efectuará de forma que el punto de funcionamiento de la instalación se localice dentro del área sombreada en la figura 4.2, antes de transcurridos 150 ms desde el inicio de la falta o desde el instante de despeje de la falta. Así, para tensiones inferiores a 0,85 pu, en el

## 7.2. ANEXO A.2

### Ficha técnica aerogenerador AE-61 Made.

	Proyecto/Project: <b>Aerogenerador MADE AE-61</b>

#### 1. OBJETO

El objeto de este documento es la definición de la configuración básica y principales parámetros del aerogenerador MADE AE-61 de 1320 kW, en su versión de funcionamiento en red de 60 Hz.

#### 2. CONFIGURACIÓN BÁSICA

##### 2.1. Datos generales

El aerogenerador MADE AE-61 es una máquina, equipada con un rotor tripala, de eje horizontal y con control de potencia por entrada en pérdida aerodinámica. Sus características principales se incluyen en la tabla siguiente

Potencia nominal <i>Rated power:</i>	1320 kW
Velocidades de giro del rotor: <i>Rotor rotational speeds:</i>	18.8 rpm / 12.5 rpm
Velocidades nominales de giro del generador: <i>Generator rotational rated speeds:</i>	1822 rpm / 1214 rpm
Control de potencia: <i>Power control:</i>	Por entrada en pérdida <i>Stall machine</i>
Altura del buje sobre el suelo: <i>Hub height above ground:</i>	55.55 m.
Diámetro del rotor: <i>Rotor diameter:</i>	61 m.
Número de palas: <i>Number of blades:</i>	3

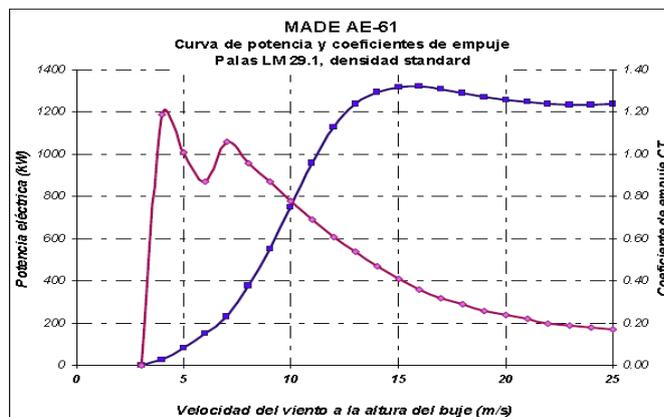
Temperatura ambiente de diseño: <i>Design ambient temperature:</i>	-20°C + 50°C
Temperatura ambiente de operación: <i>Operational ambient temperature:</i>	-10°C + 40°C
Sistema de orientación: <i>Yaw system:</i>	Activo a barlovento <i>Active upwind</i>
Freno principal del aerogenerador: <i>Main braking type of the windturbine:</i>	Aerofrenos <i>Airbrakes</i>

##### Condiciones de operación / *Operating conditions*

Velocidad de arranque: <i>Start up windspeed:</i>	3.5 m/s
Velocidad de parada: <i>Cut off windspeed:</i>	25 m/s
Clase de diseño: <i>Design windclass:</i>	Clase I según GL <i>Class I according GL</i>

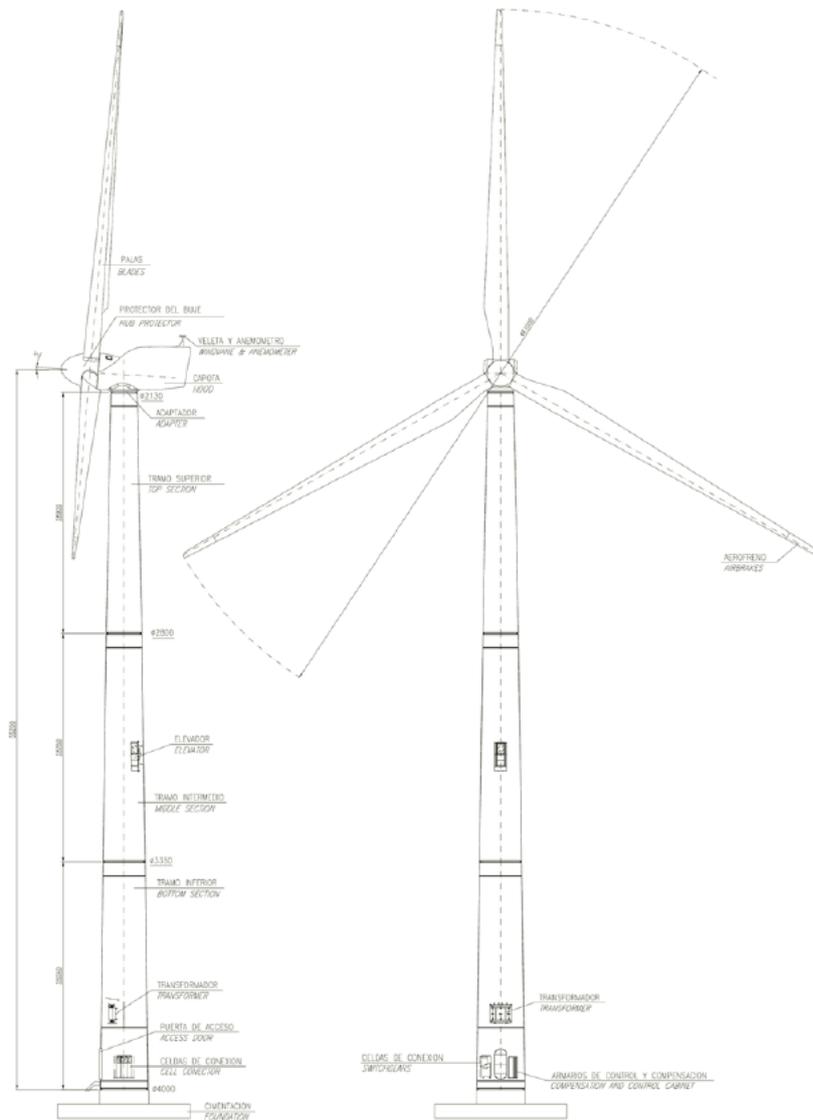
#### 3. CURVA DE POTENCIA TEÓRICA

A continuación se muestra la curva de potencia teórica, con intensidad de turbulencia nula y en condiciones estándar de densidad (1.225 kg/m<sup>3</sup>, nivel del mar y temperatura de 15°C).



#### 4. ESQUEMA GENERAL DE LA MÁQUINA

A continuación se muestra un esquema general de la máquina, con las cotas más representativas.



	Proyecto/Project: <b>Aerogenerador MADE AE-61</b>

## 5. PRINCIPALES COMPONENTES

### 5.1. Rotor

El tipo de rotor será tripala de eje horizontal, con control de potencia por entrada en pérdida. La pala elegida para el mismo es la LM 29.1 (longitud de pala 29.15 m) por lo que al usar buje esférico son necesarios de unos alargadores de aproximadamente 0.5 m. (para un buje de 1.7 m. diámetro).

El ángulo de inclinación del eje de giro del rotor respecto a la horizontal es de 5° (ángulo de tilt), y no se introduce ángulo de conicidad.

La pala viene equipada con dispositivos aerodinámicos que optimizan el comportamiento de esta tanto desde un punto de vista estructural-dinámico como de actuaciones.

El sentido de giro del rotor, visto desde aguas arriba, es horario.

Los principales datos del rotor son los que se muestran en la siguiente tabla

Diámetro del rotor: <i>Rotor diameter:</i>	<b>61 m.</b>
Área barrida por el rotor: <i>Swept area of the rotor:</i>	<b>2922.47 m<sup>2</sup></b>
Velocidades de giro del rotor: <i>Rotor rotational speeds:</i>	<b>18.8 rpm / 12.5 rpm</b>
Velocidades en punta de pala: <i>Blade tip speeds:</i>	<b>60 m/s / 40 m/s</b>
Ángulo de inclinación: <i>Tilt angle:</i>	<b>5 °</b>
Ángulo de conicidad del rotor: <i>Coning angle:</i>	<b>0 °</b>
Tipo de pala <i>Blade type</i>	<b>LM 29.1</b>
Ángulo de calado densidad estándar: <i>Pitch angle standard density:</i>	<b>-0.7 ° con vortex y stall strips ( with vortex and stall strips )</b>
Material de la pala <i>Blade material</i>	<b>Fibra de vidrio y resina de poliéster Fibreglass and polyester resin.</b>
Peso de la pala: <i>Blade weight:</i>	<b>4900 kg ±3%</b>
Peso del buje esférico: <i>Spherical hub weight:</i>	<b>5150 kg</b>
Peso de los alargadores: <i>Extenders weight:</i>	<b>540 kg cada uno (incluyendo bridas y pernos). 540 kg each (flanges and bolts included).</b>

### 5.2. Tren de potencia

El tren de potencia está constituido por el eje lento, el soporte principal de dicho eje, el multiplicador de velocidades y el acoplamiento. Su misión es transmitir la potencia mecánica al generador eléctrico en las condiciones adecuadas para la generación de electricidad.

El eje principal, realizado en acero forjado, se une al buje a través de una brida atornillada. Dicho eje se apoya sobre un rodamiento de doble hilera de rodillos en su parte delantera y se une al multiplicador mediante un aro Stüwe de compresión.

Se presentan las características del rodamiento y soporte principal, así como las del aro Stüwe de compresión

Tipo de rodamiento: <i>Type of bearing:</i>	<b>De rodillos a rótula Spherical roller bearing</b>
Tipo de aro Stüwe: <i>Type of Stüwe compression ring:</i>	<b>HSD 530-81-530 / 440</b>
Diámetro interno: <i>Inner diameter:</i>	<b>440 mm</b>

El multiplicador tiene una relación de velocidades de 1:96.9, que consigue mediante una primera etapa planetaria y dos etapas más de ejes paralelos helicoidales. El sentido de giro en eje lento y eje rápido es el mismo. La potencia nominal de entrada en el eje lento es de 1420 kW.

El multiplicador es tipo pendular, y va montado sobre dos brazos de reacción separados 2200 mm, que descansan sobre apoyos de gomas elásticas.

Relación de multiplicación: <i>Speed ratio:</i>	<b>1:96.9</b>
--	---------------

El acoplamiento entre multiplicador y generador es elástico, con capacidad de absorber desalineamientos de hasta 1.0° en operación en continuo. El freno mecánico se monta sobre el eje rápido del multiplicador, y consiste en un disco sobre el que actúa una pinza hidráulica, segura ante el fallo.

	Proyecto/Project: <b>Aerogenerador MADE AE-61</b>

### 5.3. Sistema eléctrico

El generador tiene un doble devanado estático de 4 y 6 polos, lo que permite elegir, en función de la velocidad del viento, cual de los dos se conecta a la red, optimizando así el rendimiento de la transformación energética y características aerodinámicas, a la vez que se reduce el nivel de ruido a bajas velocidades de viento. La potencia de conmutación está en el entorno de los 230 kW .

Las principales características del generador son

Tipo de generador <i>Type of generator</i>	<b>Asíncrono trifásico, 4 y 6 polos</b> <i>Asynchronous three-phases, 4 and 6 poles</i>
Potencia nominal: <i>Rated power:</i>	<b>1400 / 300 kW</b>
Tensión de alimentación: <i>Mains voltage:</i>	<b>690 V ± 5%</b>
Frecuencia de red: <i>Mains voltage:</i>	<b>60 Hz ± 2%</b>
Tipo de refrigeración: <i>Cooling system:</i>	<b>Aire / aire</b> <i>Air / air</i>

El generador se sitúa en la parte trasera de la góndola, en la parte lateral izquierda. A su lado se encuentra el armario de contactores del generador y el módulo de tiristores. Éste último se encarga del arranque y acoplamiento suaves del generador a la red así como de la conmutación entre polos.

El armario de potencia se conecta a un transformador de 1400 kVA situado en la base de torre, en el que se eleva la tensión hasta 34,5 kV, para ser entregada a la red a través de las correspondientes celdas de media tensión. En la base de la torre se encuentran el armario de control del aerogenerador y el módulo de compensación de reactiva, formado por escalones de condensadores y los dispositivos de protección correspondientes.