

COMPORTAMIENTO DE GENERADORES ELÉCTRICOS FRENTE A PERTURBACIONES



Autor: Javier Gallardo Gómez
Tutor : Antonio de la Villa Jaén

ÍNDICE

• ÍNDICE	Pág. 2
• PRÓLOGO	Pág. 4
• CAPÍTULO 1: MODELOS	Pág. 10
o 1.1 Introducción	Pág. 11
o 1.2 Modelo de red	Pág. 11
o 1.3 Modelo del transformador	Pág. 14
o 1.4 Modelo del generador	Pág. 16
o 1.5 Modelo de línea	Pág. 23
o 1.6 Modelo de la batería de condensadores	Pág. 26
o 1.7 Modelo del par	Pág. 27
o 1.8 Modelo de las vibraciones	Pág. 28
o 1.9 Modelo de falta	Pág. 29
• CAPÍTULO 2: SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA	Pág. 31
o 2.1 Actuación como motor	Pág. 32
o 2.2 Actuación como generador	Pág. 37
o 2.3 Actuación transitoria de motor a generador	Pág. 40
o 2.4 Actuación como motor y generador con perturbación en el par	Pág. 45
o 2.5 Actuación como motor y generador con batería de condensadores	Pág. 48
• CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA	Pág. 51
o 3.1 Actuación como motor	Pág. 54
o 3.2 Actuación como generador	Pág. 58
• CAPÍTULO 4: COMPORTAMIENTO DE GENERADORES AISLADOS	Pág. 61
o 4.1 Actuación de red con carga variable	Pág. 62
o 4.2 Actuación de generador asíncronos con carga	Pág. 67
o 4.3 Actuación de generador síncrono con carga variable y bloque de control	Pág. 75
• CAPÍTULO 5: COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN ESTÁTICO PARA PARQUES EÓLICOS	Pág. 81
o 5.1 Introducción	Pág. 82
o 5.2 Régimen estático	Pág. 85
o 5.3 Objeto	Pág. 85
o 5.4 Esquema unifilar y descripción del modelo	Pág. 85
o 5.5 Resultados	Pág. 88
o 5.6 Conclusiones	Pág. 94
• CAPÍTULO 6: COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTA TRIFÁSICAS EN GENERACIÓN SÍNCRONA Y ASÍNCRONA	Pág. 95
o 6.1 Comportamiento frente a faltas trifásicas en generación asíncrona	Pág. 96
o 6.2 Comportamiento frente a faltas trifásicas en generación síncrona	Pág. 101
o 6.3 Comportamiento frente a faltas monofásicas en generación asíncrona	Pág. 106
o 6.4 Comportamiento frente a faltas monofásicas en generación síncrona	Pág. 109
• BIBLIOGRAFÍA	Pág. 113

PRÓLOGO

PRÓLOGO

Hasta la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal para la realización de trabajo mecánico era la generada por el agua o el viento. La primera forma de aprovechamiento de la energía eólica fue en la navegación; las primeras referencias de la utilización de embarcaciones a vela proceden de Egipto y datan del IV ó V milenio antes de J.C.

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Hammurab I. rey de Babilonia, 17 siglos antes de J.C. utilizó molinos accionados por el viento para regar las llanuras de Mesopotamia y para la molienda del grano. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las ruedas del molino. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, máquinas conocidas como panémonas, precursoras de los molinos persas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. Si el origen de las máquinas eólicas presenta notables incertidumbres, no menos lo hace su expansión por el Mediterráneo y por toda Europa. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical. Sea cual fuese la forma de aparición de estas máquinas en diversos países europeos, lo cierto es que se encuentran abundantes ejemplos de la importancia que los molinos de viento llegaron a tener en diversas aplicaciones; citemos como ejemplo relevante los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda y los no menos conocidos molinos holandeses usados desde 1430 para la desecación de los polders, todos ellos de eje horizontal. En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Polder fue drenado con la ayuda de estas máquinas; sin embargo, no sólo utilizaron los molinos para drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler grano, etc. Precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

En 1724 Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón; en 1883 aparece el pequeño multipala americano diseñado por Steward Perry. Este molino, de unos 3 metros de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento. Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar la aeroturbina danesa de Lacourt (1892), máquina capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW.

Hasta ese momento, las velocidades típicas que se habían conseguido con los multipala eran de dos veces la del viento, mientras que los molinos clásicos habrían funcionado con velocidades en el extremo de la pala del mismo orden de magnitud que la del viento.

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos: Joukowski, Drzewiechy y Sabinin en Rusia; Prandtl y Betz en Alemania; Constantin y Enfield en Francia, etc, establecen los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas.

En el año 1910 Dinamarca tenía instalada una potencia eólica de 200 MW.

En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores a la del viento incidente. Betz demostró en su famoso artículo "*Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung*", (Berlín 1927), que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Por lo tanto, los nuevos rotores debían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir rendimientos más elevados.

La teoría demostró también que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso construirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra Mundial.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía. Sin embargo, el petróleo presentaba un grave inconveniente al crear una dependencia entre los países consumidores y los productores, de forma que cuando el orden económico se veía alterado por alguna crisis y la dependencia energética se hacía patente, se adoptaban políticas de apoyo de los recursos autónomos, que se abandonaban una vez se superaba la crisis.

La primera de estas etapas fue una consecuencia inmediata de la Primera Guerra Mundial. Con una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal y escasez de recursos para importar petróleo, las turbinas eólicas continuaron desarrollándose por dos caminos diferentes.

Por un lado, hacia el diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de baja potencia, capaces de generar electricidad en áreas rurales aisladas, a las que todavía no habían llegado las redes eléctricas.

Por otro, y a la sombra de una industria aeronáutica en pleno desarrollo, hacia el diseño y construcción de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala.

Este apoyo a los recursos energéticos autóctonos, que comenzó inmediatamente después de la guerra, se mantuvo durante la década siguiente, como consecuencia de la política proteccionista adoptada por los países occidentales tras la crisis de 1929.

Durante este período fueron innumerables los trabajos realizados sobre plantas eólicas de gran potencia en Europa y USA, centrandose los programas eólicos su interés en aspectos diferentes como la evaluación de los recursos disponibles, obtención y tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos, localización de emplazamientos y cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia. A la vez que intentó crear incentivos que motivasen a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitiesen cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

Dentro de los grandes proyectos, el Honnef alemán consistía en instalar torres de 300 metros de altura, con 3 ó 5 rotores de 150 metros de diámetro, capaces de generar 75 MW. aunque se realizaron estudios a pequeña escala, el prototipo de esta central fue destruido en una incursión aérea.

El anteproyecto Heronemus (U.S.A.) consistía en la construcción de estaciones eólicas compuestas por torres de 113 metros de altura con tres rotores de 73 metros de diámetro; se pensaba que con 1400 estaciones de este tipo, ubicadas en la costa se podría generar el 8% de la demanda eléctrica U.S.A.

En 1931 se instaló en el Mar Negro una máquina eólica de 100 kW.

Entre 1941 y 1945 estuvo funcionando en U.S.A, una unidad de 1,2 MW.

Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, y como consecuencia del período de escasez que siguió, los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas que se proyectaban.

El segundo periodo de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de los sesenta en que, una vez restablecida la economía internacional, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales (por el bajo precio del petróleo) hasta 1973. A partir de entonces los altos precios del petróleo favorecieron el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos.

En esta época, las redes de transporte y distribución empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas.

El período terminó con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre sí.

Solamente en Francia, Dinamarca e Inglaterra se llevaron a cabo programas de cierta importancia. El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21.000, según datos de la Agencia Internacional de la Energía, con un total de potencia de 2.200 MW, equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia, y de los cuales la mitad estaban instalados en los parques eólicos de California.

A finales de 1991 la potencia de origen eólico instalada en la red eléctrica danesa ascendía a 410 MW con una producción de energía equivalente al 2,3% del consumo del país. En Alemania la potencia instalada era de 100 MW y estaba previsto alcanzar los 250 MW en breve plazo.

Holanda contaba con 80 MW de potencia instalada y 100 más en construcción. El programa eólico holandés tiene previsto alcanzar los 2.000 MW en el 2010.

En cuanto al tipo de máquinas de mayor interés, los resultados obtenidos de las numerosas experiencias realizadas permitieron concretar el campo de

trabajo en dos modelos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y, en menor medida, las turbinas Darrieux de eje vertical.

El tamaño medio de las máquinas instaladas hasta 1990 estaba en el rango de los 100 KW, aunque se observaba una clara tendencia ascendente.

En los últimos 10 años los pequeños aerogeneradores aumentaron poco a poco sus potencias, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducían sus costes; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 KW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costes, convergiendo hacia una nueva generación de aeroturbinas de 500 KW a 1,2 MW e incluso 2 MW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología.

La fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de distribución de electricidad muy extendidas, ya que los costes superiores de la energía en instalaciones pequeñas e individuales las hacen poco rentables.

El precio del kW/h eólico puede ser, en aerogeneradores de potencia media, la mitad que en los aerogeneradores de potencia baja. La rentabilidad de las aeroturbinas eólicas implica el intentar disminuir costos, tanto en su instalación inicial, como en los gastos de mantenimiento, procurando que el tiempo de vida de la instalación sea superior al del período de amortización.

CAPÍTULO 1

MODELOS

CAPÍTULO 1: MODELOS

1.1 INTRODUCCIÓN

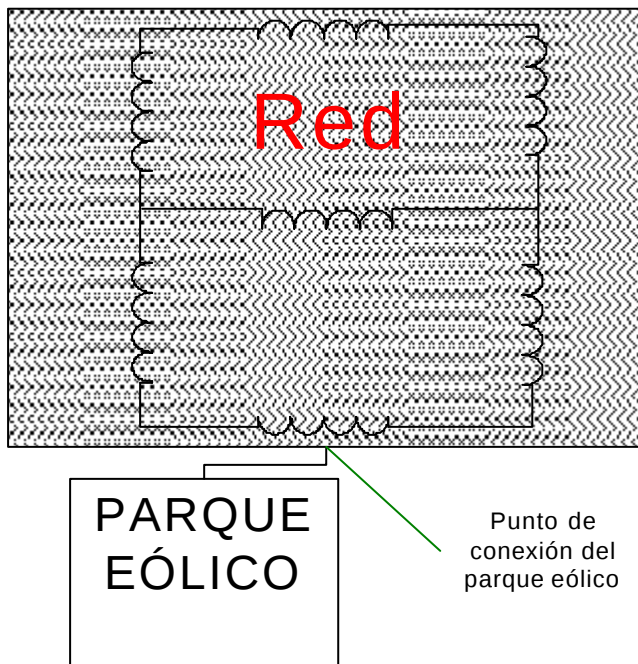
Dentro del estudio que se pretende realizar, la primera de la actuaciones que se debe de llevar a cabo es la realización de modelos que permitan definir de forma clara y con la mayor precisión posible todas las características de los elementos involucrados. Para ello se contará con la ayuda del programa *Simulink* que se encuentra dentro del paquete informático *Matlab*. En él, se encuentran la mayoría de los elementos para modelar un sistema eléctrico, aunque se tendrán que perfilar cada una de las características, según las necesidades.

Es importante señalar las limitaciones del programa *Matlab* a la hora de la realización de las simulaciones. En algunos casos se simplificará el modelo, debido a que la complejidad del mismo no permite que se obtengan resultados en un tiempo admisible. Además hay que señalar que *Matlab* es un programa de cálculo numérico, por lo que alguno de los resultados que se obtendrán no tendrán una explicación física, sino que será el resultado matemático de la resolución de las ecuaciones que definen el sistema.

Para cada uno de los modelos que se vayan desarrollando se realizará una pequeña explicación teórica, los datos que son necesarios para definir el modelo, la representación empleada en la simulación y si ha lugar un esquema explicativo.

1.2 EL MODELO DE RED

Posiblemente uno de los modelos más difícil de definir es el referente a la red, ya que este dependerá directamente de la topología de la red. La



topología será diferente en cada momento puesto que la configuración de la red eléctrica se ve modificada por maniobras, mantenimiento, descargos ,etc.

Se considerará que el parque eólico que se está simulando, está conectado a la red en un punto y que éste siempre se encuentra a la misma tensión y a la misma potencia de cortocircuito ; para ello la topología de la red no cambiará. Además se considerará la red lo suficientemente mallada como para mantener los valores de la tensión y que el parque se

gráfico 1- 1 Esquema de conexión

encuentra lo suficientemente cerca de los generadores haciendo que la Pcc permanezca constante a lo largo de las simulaciones.

En el modelo teórico de la red se modelará mediante una impedancia cuyo valor se corresponderá con la ecuación (1.1)

$$Z_{red} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k^*} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k^*} \quad (1.1)$$

Donde:

- Z_{red} = Impedancia de la red
- U_n = Tensión compuesta de red en vacío
- S_k^* = Potencia de cortocircuito simétrica inicial.
- I_k^* = Corriente de cortocircuito simétrica inicial.
- c = Factor de tensión.

El valor de c viene justificado por posibles variaciones en el espacio y en el tiempo, cambios en las tomas de los transformadores, no tener en cuenta las cargas y capacidades en los cálculos y comportamientos. (tabla 1-1)

Tensiones nominales U_n	cálculo de la corriente de cortocircuito máxima c_{max}	cálculo de la corriente de cortocircuito mínima c_{min}
Baja tensión: 100 a 1000 V 230 V/400 V Otros valores (Norma CEI 38 tabla 1)	1,00 1,05	0,95 1,00
Media tensión: 1 a 35 kV (Norma CEI 38 tabla 3)	1,10	1,10
Alta tensión: 35 a 380 kV (Norma CEI 38 tabla 4)	1,10	1,00

tabla 1- 1 Valor c

Si la tensión de la red es superior a 35 kV se puede considerar la impedancia como una bobina (ecuación 1.2). En el resto de casos, a falta de mejores datos se puede tomar la siguiente relación entre impedancia y reactancia y entre resistencia y reactancia según las ecuaciones (1.3)

$$Z_{red} = 0 + jX_{red} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} X_{red} &= 0.995 \cdot |Z_{red}| \\ R_{red} &= 0.1 \cdot X_{red} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Donde:

- Z_{red} = Impedancia de la red
- X_{red} = Reactancia de la red

R_{red} = Resistencia de la red

El modelo utilizado de la librería del programa *Simulink* será el bloque <3-Phase Source> cuya representación es la del gráfico 1-2. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros definidos en la tabla 1-2.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

tabla 1- 2 Parámetros del bloque de red

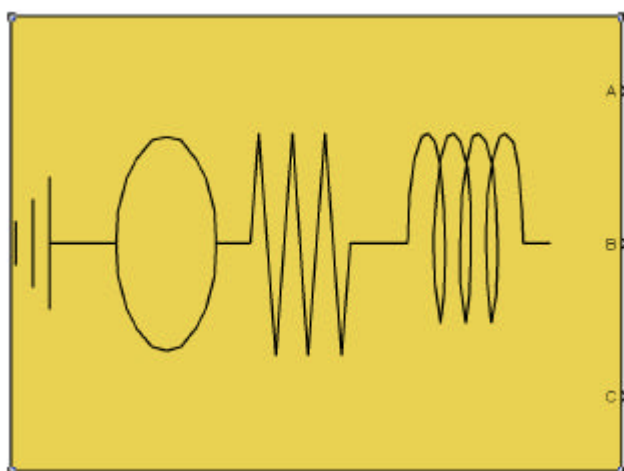


gráfico 1- 2 Modelo de la red en Simulink

1.3 EL MODELO DEL TRANSFORMADOR

El modelo del transformador de potencia trifásico es una extensión del modelo monofásico, siguiendo éste un esquema equivalente como se ve en el gráfico 1-3. Ahora los devanados son tres, pudiendo disponerse en distintas conexiones (estrella, triángulo, zig-zag) lo que da lugar a diferentes relaciones de transformación con igual configuración magnética.

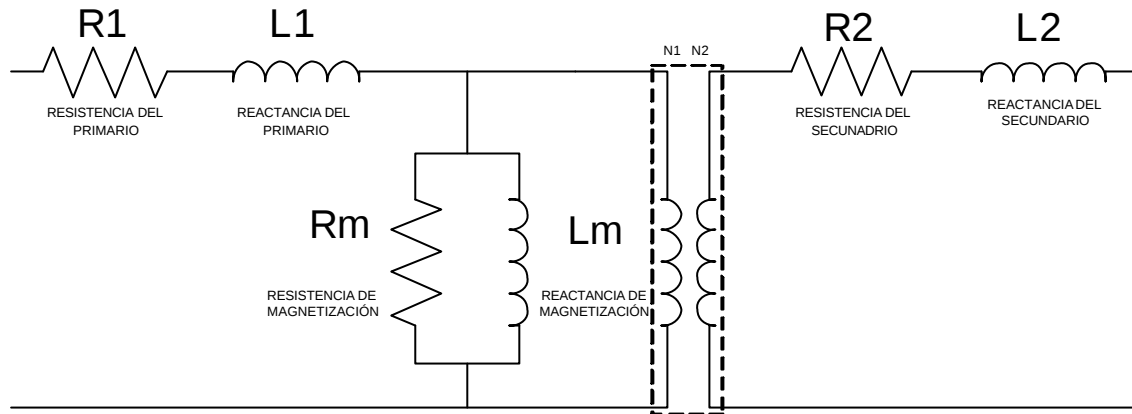


gráfico 1- 3 Modelo del transformador

En las simulaciones se harán dos tipos de transformaciones, dependiendo del tipo de máquina instalada. Si la es asíncrona se realizará una transformación 20/0.69 kV. En el caso de que la máquina sea síncrona la transformación será 20/0.4 kV.

Considerando que la rama magnética se puede despreciar, debido al alto valor de la admitancia y pasando la impedancia del secundario al primario, se puede estimar el valor de la impedancia total del transformador con las siguientes ecuaciones

$$Z_T = \frac{u_{kr} \cdot U_{rT}^2}{100 S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr} \cdot U_{rT}^2}{100 S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (1.4)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

Donde:

- Z_T = Impedancia del transformador.
- X_T = Reactancia del transformador.
- R_T = Resistencia del transformador.
- U_{rT} = Tensión compuesta asignada al transformador.
- S_{rT} = Potencia aparente asignada al transformador.
- u_{kr} = Tensión de cortocircuito asignada del transformador en %.
- u_{kr} = Tensión de cortocircuito resistiva asignada del transformador en %.
- I_{rT} = Corriente asignada del transformador.

P_{krT} = Pérdidas totales en los devanados del transformador a la corriente asignada.

El modelo utilizado de la librería del programa *Simulink* para representar al transformador será el bloque < 3-Phase Transformer (two winding) > cuya representación es la del gráfico 1-4. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-3.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	10
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	?
Conexión secundario	Yg
Tensión fase-fase secundario del transformador Asíncrono-Síncrono (kV)	0.69 -0.4
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

tabla 1- 3 Parámetros del bloque del transformador

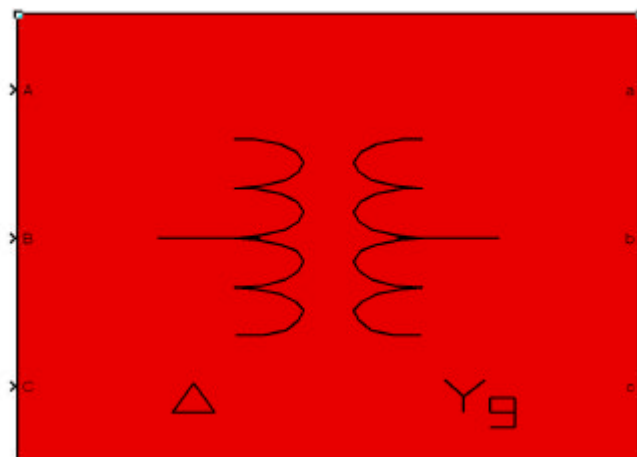


gráfico 1- 4 Modelo del transformador en Simulink

1.4 EL MODELO DEL GENERADOR

La misión del generador es la de transformar en energía eléctrica la energía mecánica extraída desde el eje de alta velocidad.

Para modelar las máquinas eléctricas se utilizarán las ecuaciones diferenciales asociadas a éstas. Dichas ecuaciones son complejas ya que dependen, entre otras cosas, de la posición relativa del rotor con respecto al estator. Por ello, para la obtención de una solución a dichas ecuaciones se suelen emplear cambios de variable que las simplifiquen. Una de esas transformaciones es la conocida como transformada d-q. Mediante la transformación en coordenadas d-q, a partir de un sistema trifásico, ya sea de tensiones, intensidades o flujos, supuesto sobre un sistema de ejes a-b-c que forman 120° , se obtiene un sistema equivalente de tensión, intensidad o flujo, asociado a unos ejes que forman 90° , llamados d-q, y que giran a una determinada velocidad. El objeto de dicha transformación es que se pueden derivar sistemas de ecuaciones más sencillos.

1.4.1 GENERADOR ASÍNCRONO

Consideramos como generador asíncrono al convertidor electromecánico que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, bajo la forma de corrientes alternas. Consta de una corona estatórica con un devanado polifásico distribuido alojado en su interior y de una corona rotórica con otro devanado polifásico alojado en su interior.

Su configuración más convencional (para el caso de la energía eólica), consiste en una turbina de 3 palas acoplada a través de un multiplicador de velocidad a un generador de tipo asíncrono, y conectado directamente a la red. A este tipo de sistemas se les denomina sistemas de velocidad fija, puesto que al estar conectados directamente a la red eléctrica tienen una velocidad de sincronismo constante y por tanto la velocidad de giro es totalmente invariable.

La alternativa más simple para este tipo de aerogeneradores y la más instalada, es aquella en la que el generador eléctrico empleado tiene el rotor cortocircuitado (jaula de ardilla) y conectado rígidamente a la red. Aunque se suelen denominar de velocidad constante, admiten variaciones inferiores al 2% con respecto a su velocidad nominal o síncrona. En los aerogeneradores se suelen emplear motores asíncronos con deslizamiento elevados para disminuir la rigidez entre el acoplamiento de la turbina y la red.

En referencia a la producción de energía se puede decir que estas máquinas están optimizadas para una velocidad de viento. Esto quiere decir que, a otras velocidades el coeficiente de potencia no será el óptimo, aunque la turbina disponga de control sobre el paso de pala.

Las ecuaciones para el modelo son las siguientes, y el modelo está representado en el gráfico 1-5.

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} j_{qs} + \omega j_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} j_{ds} + \omega j_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} j'_{qr} + (\omega - \omega_r) j'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} j'_{dr} + (\omega - \omega_r) j'_{qr}
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Siendo:

$$\begin{aligned}
 j_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\
 j_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\
 j_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\
 j_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

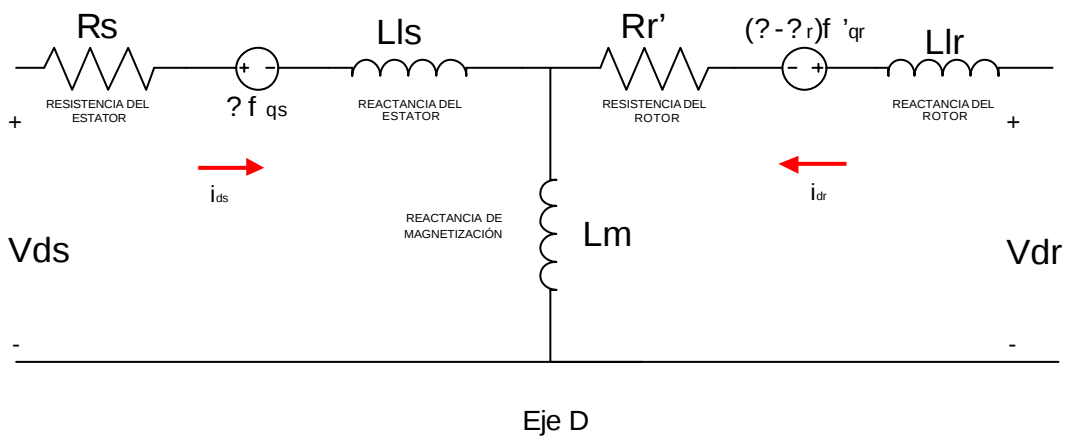
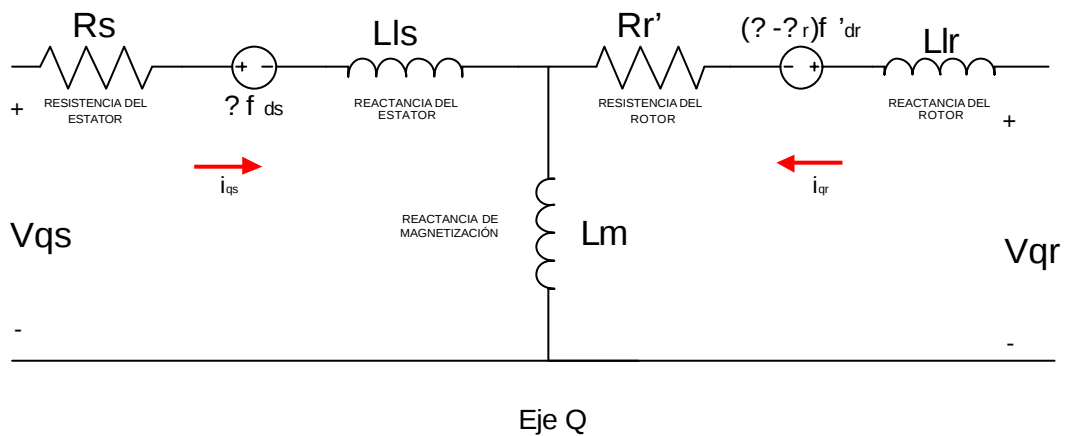


gráfico 1- 5 Modelo del generador asíncrono

Donde:

R_s	= Resistencia del estator
L_{ls}	= Reactancia del estator
R_r	= Resistencia del rotor
L_{lr}	= Reactancia del rotor
L_m	= Reactancia de magnetización
L_s	= Reactancia total del estator
L_r	= Reactancia total del rotor
V_{qs}	= Tensión del estator referida al eje q
V_{qr}	= Tensión del rotor referida al eje q
i_{qs}	= Intensidad del estator referida al eje q
i_{qr}	= Intensidad del rotor referida al eje q
V_{ds}	= Tensión del estator referida al eje d
V_{dr}	= Tensión del rotor referida al eje d
i_{ds}	= Intensidad del estator referida al eje d
i_{dr}	= Intensidad del rotor referida al eje d
ψ_{qs}	= Flujo del estator referido al eje q
ψ_{ds}	= Flujo del estator referido al eje d
ψ_{qr}	= Flujo del rotor referido al eje q
ψ_{dr}	= Flujo del rotor referido al eje d
ω	= Velocidad angular
ω_r	= Velocidad angular del rotor

PARÁMETROS DEL BLOQUE asynchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	690
Potencia nominal (KVA)	650
Resistencia del estator (ohm)	0.0073
Reactancia del estator (H)	0.0002387
Inductancia mutua (H)	0.0103
Resistencia del rotor (ohm)	0.0065
Reactancia del rotor (H)	0.0002864
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	2

tabla 1- 4 Parámetros del bloque del generador asíncrono.

En este bloque se definen el valor de los parámetros según la tabla 1-4. El modelo utilizado de la librería del programa Simulink será el bloque <Asynchronous Machine SI unit > cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-6.

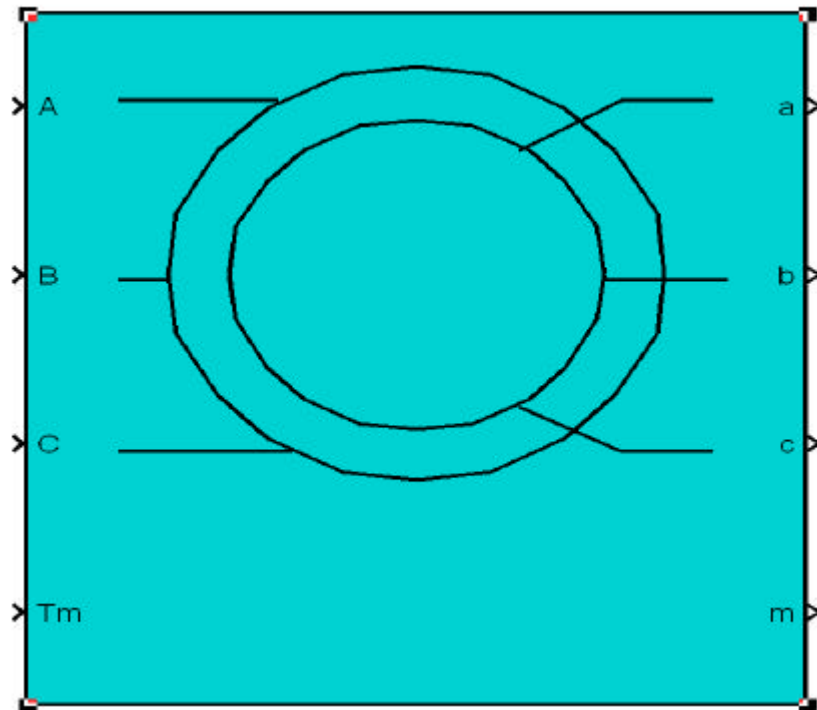


gráfico 1- 6 Modelo del generador asíncrono en Simulink

1.4.2 GENERADOR SÍNCRONO

Consideramos como generador síncrono al convertidor electromecánico que girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, transforma la energía mecánica en energía eléctrica, bajo la forma de corrientes alternas. Consta de un devanado inducido y un devanado inductor concatenados por un campo magnético, caracterizándose por tener el devanado inducido en el estator, y el devanado inductor, alimentado por corriente continua, en el rotor.

Con todo esto las ecuaciones son las siguientes, y el modelo está representado en el gráfico 1-7:

$$\begin{aligned}
V_{sq} &= -i_{sq}r_s - w_r j_{sd} + \frac{d}{dt} j_{sq} \\
V_{sd} &= -i_{sd}r_s + w_r j_{sq} + \frac{d}{dt} j_{sd} \\
0 &= r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} j_{kq} \\
V_{fd} &= i_{fd}r_{fd} + \frac{d}{dt} j_{fd} \\
0 &= r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt} j_{kd}
\end{aligned} \tag{1.7}$$

Siendo:

$$\begin{aligned}
j_{qs} &= -L_q i_{qs} + L_{mq} i_{kq} \\
j_{ds} &= -L_d i_{ds} + L_{md} [i_{fq} + i_{kd}] \\
j_{kq} &= -L_{mq} i_{qs} + L_{kq} i_{kq} \\
j_{fd} &= -L_{md} i_{ds} + L_{fd} i_{fd} + L_{kd} i_{kd} \\
j_{kd} &= -L_{md} i_{ds} + L_{md} i_{fd} + L_{kd} i_{kd}
\end{aligned} \tag{1.8}$$

Donde:

V_{sq}	= Tensión del estator referida al eje q
V_{sd}	= Tensión del estator referida al eje d
i_{sq}	= Intensidad del estator referida al eje q
i_{sd}	= Intensidad del estator referida al eje d
f_{qs}	= Flujo del estator referido al eje q
f_{ds}	= Flujo del estator referido al eje d
V_{fd}	= Tensión del devanado de excitación referido al estator
i_{fd}	= Intensidad del devanado de excitación referido al estator
f_{fd}	= Flujo del devanado de excitación referido al estator
i_{kd}	= Intensidad del devanado amortiguador del eje d referido al estator
f_{kd}	= Flujo del devanado amortiguador del eje d referido al estator
i_{kq}	= Intensidad del devanado amortiguador del eje q referido al estator
f_{kq}	= Flujo del devanado amortiguador del eje q referido al estator
r_s	= Resistencia del estator
r_{fd}	= Resistencia de la excitación de campo referida al estator
r_{kq}	= Resistencia del amortiguador del eje q referida al estator
r_{kd}	= Resistencia del amortiguador del eje d referida al estator

Respecto a las relaciones entre flujos e intensidades:

- L_{ls} = Reactancia del estator
- L_{md} = Reactancia del eje d
- L_{mq} = Reactancia del eje q
- L_d = Reactancia síncrona del eje d $I_d = I_{ls} + I_{md}$
- L_q = Reactancia síncrona del eje q $I_q = I_{ls} + I_{mq}$
- L_{lfd} = Reactancia de dispersión del devanado de excitación
- L_{lkd} = Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del eje d
- L_{lkq} = Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del Eje q
- L_{fd} = Reactancia del devanado de excitación $I_{fd} = I_{lfd} + I_{md}$
- L_{kd} = Reactancia del devanado de amortiguación del eje d
 $I_{kd} = I_{lkd} + I_{md}$
- L_{kq} = Reactancia del devanado de amortiguación del eje q
 $I_{kd} = I_{lkd} + I_{mq}$

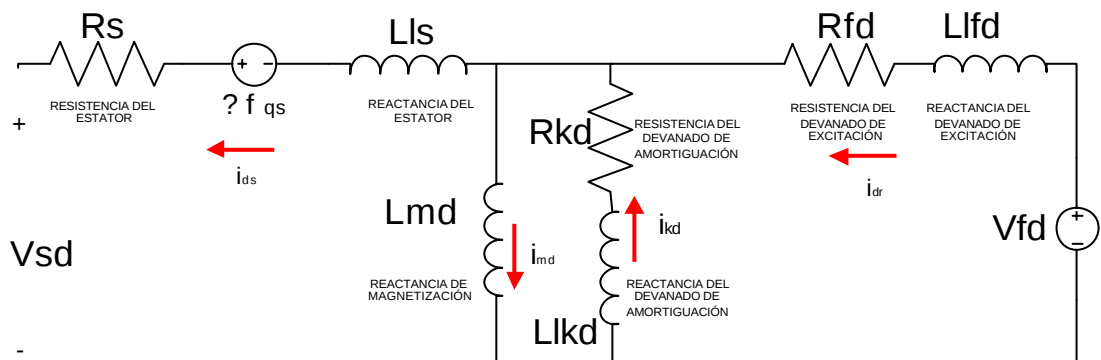
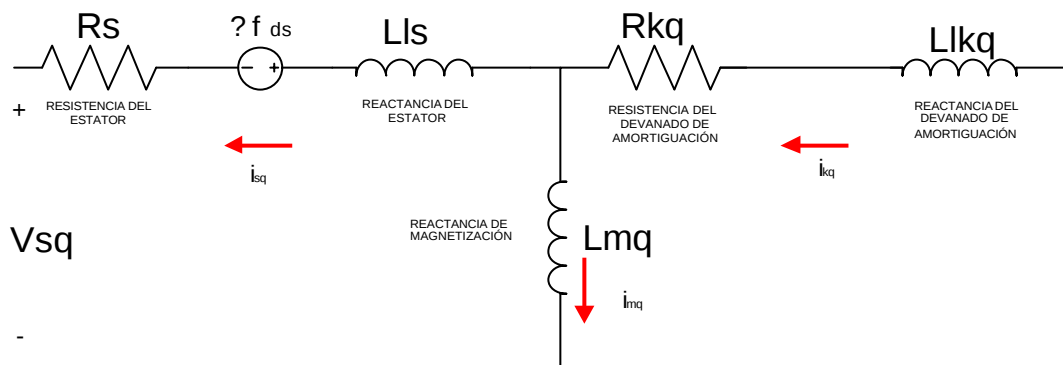


gráfico 1- 7 Modelo del generador síncrono

El modelo utilizado de la librería del programa Simulink será el bloque <Synchronous Machine> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-8. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-5.

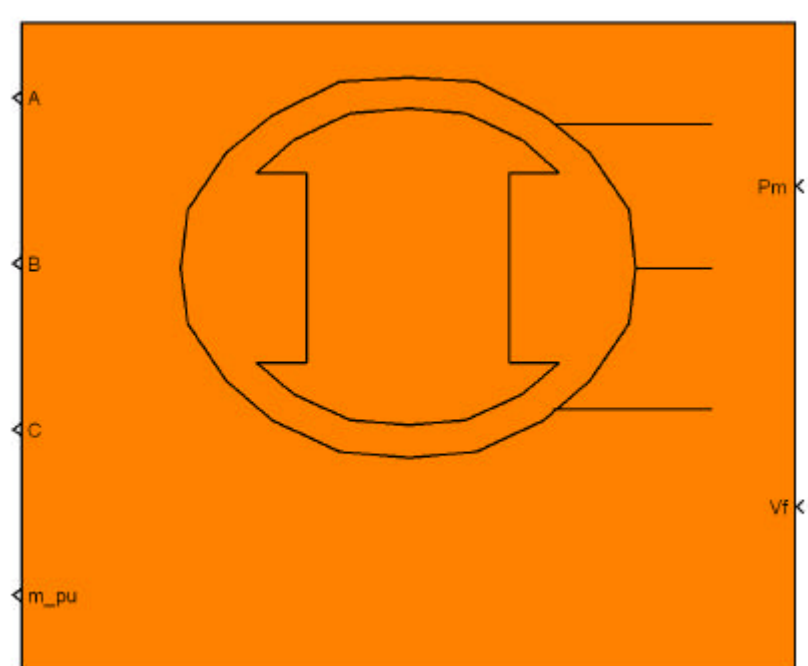


gráfico 1- 8 Modelo del generador síncrono en Simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE synchronous machine p.u.	valores
Tipo de rotor	Bobinado
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	400
Potencia nominal (KVA)	650
Resistencia del estator (p.u.)	0.00285
Reactancia del estator (p.u.)	0.114
Inductancia mutua eje d (p.u.)	1.19
Inductancia mutua eje q (p.u.)	0.36
Resistencia de excitación (p.u.)	0.000579
Reactancia de excitación (p.u.)	0.114
Resistencia de amortiguación eje d (p.u.)	0.0652
Reactancia de amortiguación eje d (p.u.)	0.5134

Resistencia de amortiguación eje q1 (p.u.)	0.0287
Reactancia de amortiguación eje q1 (p.u.)	0.2553
Resistencia de amortiguación eje q2 (p.u.)	0.007765
Reactancia de amortiguación eje q2 (p.u.)	0.9167
Coeficiente de Inercia	6.7
Pares de polos	20

tabla 1- 5 Parámetros del bloque del generador síncrono

1.5 EL MODELO DE LÍNEA

El modelo utilizado para la conexión del parque eólico con la red es el de una línea de parámetros distribuidos. Cuando una línea trifásica está equilibrada, viene caracterizada, en secuencia directa, por los siguientes parámetros unitarios:

- Impedancia serie o longitudinal: $Z_1 = R_1 + j L_1$ (Ohm/km)
- Admitancia *shunt* o transversal : $Y_1 = G_1 + j C_1$ (S/km)

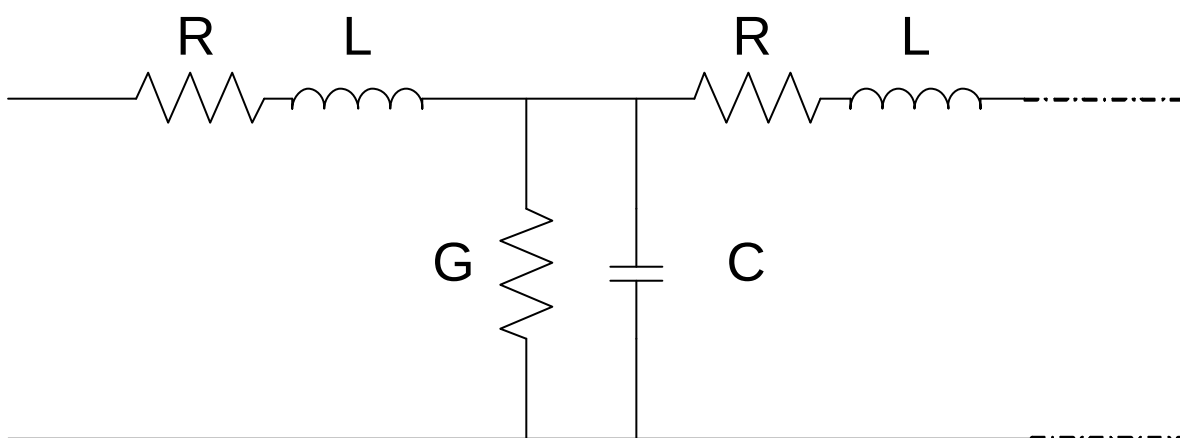


gráfico 1- 9 Modelo de una línea de transmisión de potencia

Como simplificación a dicho modelo se considerará que $G=0$. Los valores de R , L y C se calculan según las siguientes ecuaciones.

▪ **RESISTENCIA**

$$R(T) = \frac{r(T)}{S} L$$

$$r(T_2) = r(T_1) [1 + a(T_2 - T_1)]$$

Donde:

- R: Resistencia total de la línea (Ω)
- ?: Resistividad del material (Ωmm²/m)
- S: Sección del conductor (mm²)
- T: Temperatura (K)
- a: Coeficiente de temperatura (K⁻¹)
- L: Longitud (m)

▪ **REACTANCIA**

$$L = \frac{m_0}{p} \left(\ln \frac{\sqrt[N^2]{\prod_{i=1}^N \prod_{j=N+1}^{2N} d_{ij}}}{\sqrt[N^2]{\prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N d_{ij}}} \right) = \frac{m_0}{p} \ln \frac{DMG}{RMG}$$

Donde:

- DMR: Distancia media geométrica
- RMG: Radio medio geométrico
- μ₀ : Permeabilidad magnética del vacío
- d_{ij} : Distancia media entre conductores o entre ejes de haces

▪ **CAPACIDAD**

$$C = \frac{2pe_0}{\ln \frac{DMG}{RMG}}$$

Donde:

- e₀ : Permitividad del vacío

El modelo utilizado de la librería del programa Simulink será el bloque <Distributed Parameters Line> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-10. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-6.

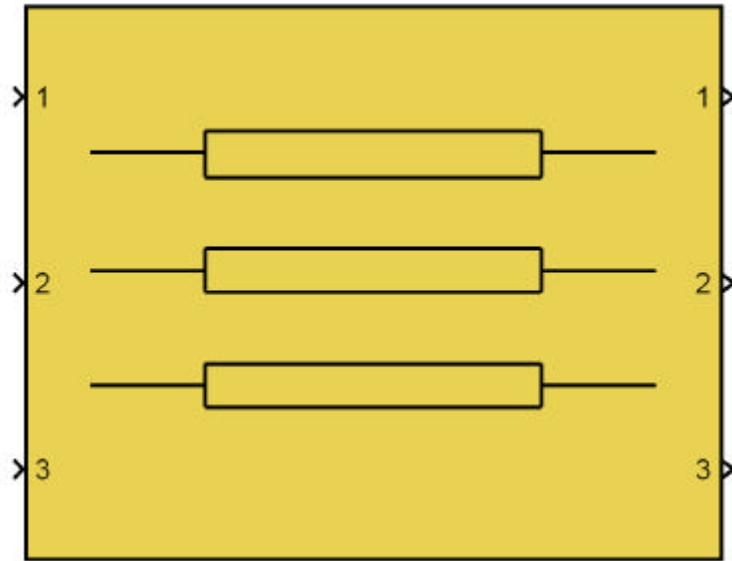


gráfico 1- 10 Modelo de una línea en simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE distributed parameters line	valores
Número de fase	3
Frecuencia (Hz)	50
Resistencia Sec-1 (Ohm/km)	0.03726
Resistencia Sec-0 (Ohm/km)	0.34223
Inductancia Sec-1 (H/km)	0.001
Inductancia Sec-0 (H/km)	0.003934
Capacidad Sec-1 (F/km)	$37.136 \cdot 10^{-9}$
Capacidad Sec-0 (F/km)	$55.973 \cdot 10^{-9}$
Longitud (Km)	10

tabla 1- 6 Parámetros del bloque de línea

1.6 EL MODELO DE LA BATERÍA DE CONDENSADORES

La batería de condensadores se incluye dentro de instalación eléctrica con el objetivo de disminuir la necesidad de potencia reactiva por parte de los generadores, sobre todo en el caso de los asíncronos. En la actualidad se pueden encontrar diversas soluciones para la corrección de la reactiva. La más extendida es la regulación mediante escalones de condensadores. La batería de condensadores se colocará a la misma tensión que el generador y con un valor tal, que se aproxime a un factor de potencia de valor unidad.

La conexión interna de la batería de condensadores se puede observar en el gráfico 1-11.

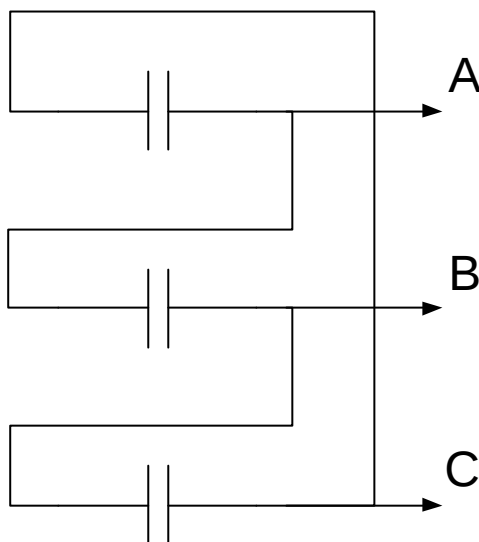


gráfico 1- 11 conexión interna de la batería de condensadores

El modelo utilizado de la librería del programa *Simulink* será el bloque <Distributed Parameters Line> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-12. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-7.



gráfico 1- 12 Modelo de la batería de condensadores en Simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión nominal (V)	690
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa (W)	0
Potencia reactiva inductiva (VAR)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (VAR)	$270 \cdot 10^3$

tabla 1- 7 Parámetros del bloque de la batería de condensadores

1.7 EL MODELO DEL PAR

Para modelar el par que suministra el aire, el salto de agua, de una minicentral hidráulica o el gasto de vapor utilizaremos una entrada de tipo constante o de tipo escalón, donde se especificará el valor del par que se quiere suministrar para el caso constante y para el caso del escalón los dos valores a considerar y el momento en el que se produce el salto de un valor a otro.

Los modelos utilizados de la librería del programa *Simulink* serán los bloques <Constant> y <Step> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-13. En estos bloques se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-8 y 1-9 respectivamente.

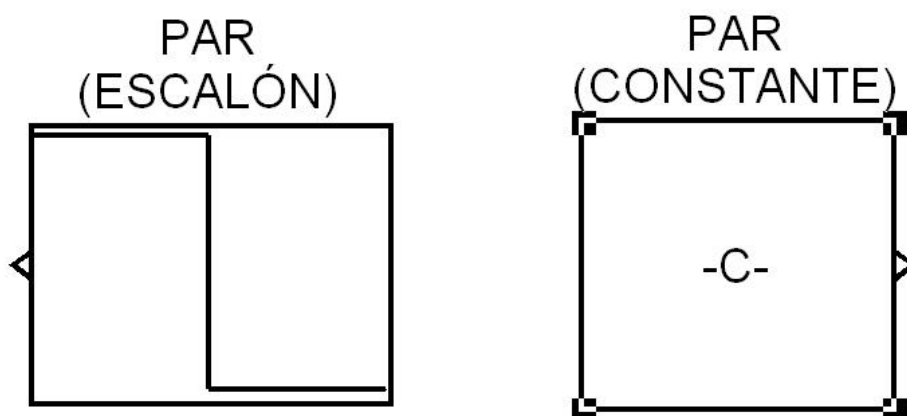


gráfico 1- 13 Modelos del par en Simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE CONSTANT	valores
Valor del par (N·m)	3810

tabla 1- 8 Parámetros del bloque del par constante

PARÁMETROS DEL BLOQUE STEP	valores
Tiempo de cambio (s)	1.25
Valor inicial del par (N·m)	3810
Valor final del par (N·m)	-3810

tabla 1- 9 Parámetros del bloque del par constante

1.8 EL MODELO DE LAS VIBRACIONES

Para poder simular las variaciones que se tienen en el par, provocadas por las perturbaciones se producen en el eje de la turbina, por ejemplo, las ráfagas de aire en el caso de una turbina eólica, se ha considerado oportuno simular dichas variaciones mediante una onda cuadrada aleatoria que oscile entre unos determinados valores en torno a la unidad. Esta forma de onda se multiplicará por el valor constante del par y se obtendrá de esta forma un valor promedio.

El modelo utilizado de la librería del programa *Simulink* será el bloque <Uniform Random Number> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-14. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-10.

ONDA CUADRADA ALEATORIA



gráfico 1- 14 Modelo de las vibraciones en Simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE uniform random number	valores
Mínimo	0.8
Máximo	1.1
Tiempo de muestreo (seg)	0.1
Valor inicial	0

tabla 1- 10 Parámetros del bloque del par constante

En el gráfico 1-15 se puede observar el resultado de una simulación de este bloque con los parámetros especificados en la tabla 1-10.

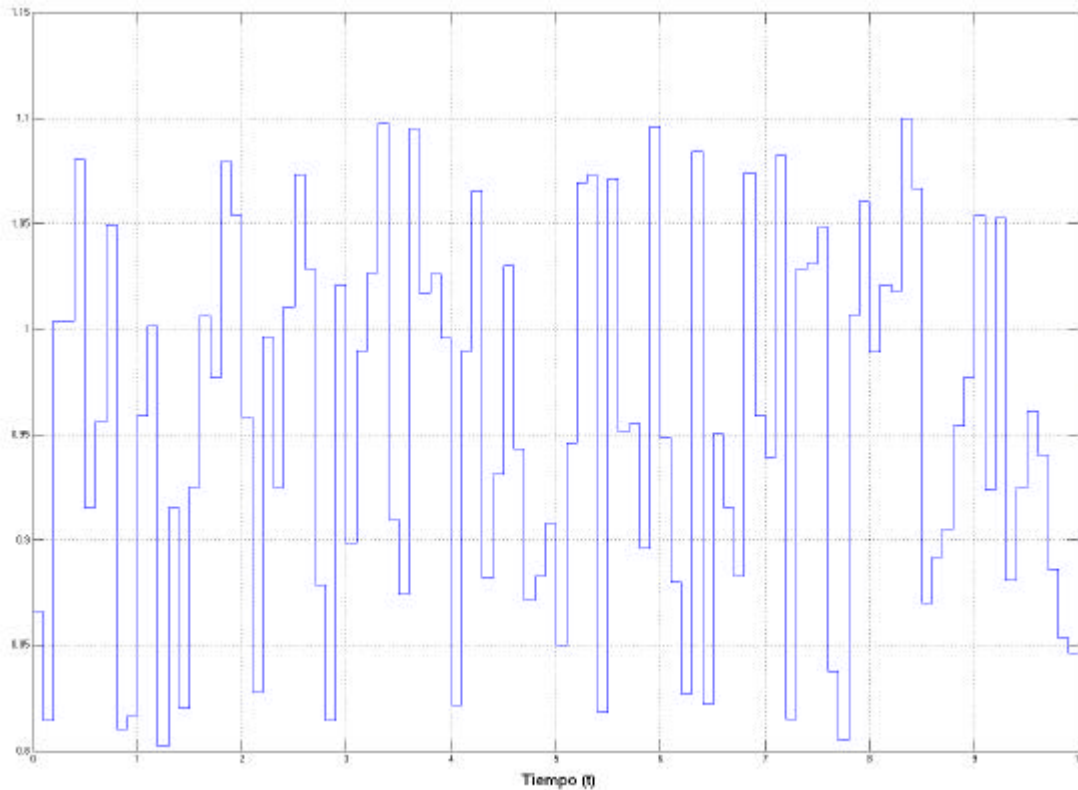


gráfico 1- 15 Resultado de una simulación de las vibraciones

1.9 EL MODELO DE LA FALTA

A la hora de realizar faltas en el sistema, se utilizará el bloque 3 Phase Fault que se encuentra en la biblioteca de *Simulink*. Mediante este bloque se podrá especificar que fases se quieren cortocircuitar y como consecuencia de esto, que tipo de cortocircuito se quiere realizar, a saber: monofásico, bifásico y trifásico. También podemos especificar el valor de las resistencias de contacto de cada una de las fases y la resistencia de puesta a tierra según se observa en el gráfico 1-16.

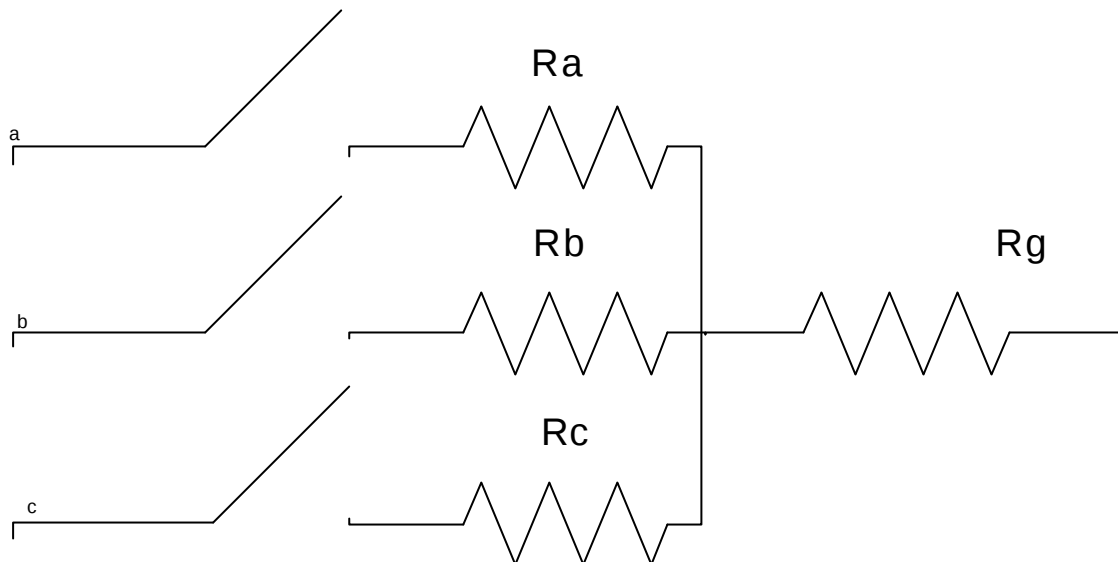


gráfico 1- 16 Esquema de las resistencias de contacto y de puesta a tierra.

El modelo utilizado de la librería del programa *Simulink* será el bloque <3 phase fault> cuya representación la podemos ver en el gráfico 1-17. En este bloque se han de definir el valor de los parámetros de la tabla 1-11.

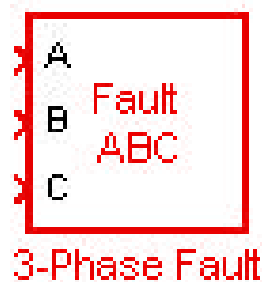


gráfico 1- 17 Modelo de las vibraciones en Simulink

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3 phase fault	valores
Falta en fase A	S/N
Falta en fase B	S/N
Falta en fase C	S/N
Resistencia Ra – Rb – Rc (Ohm)	0.001
Resistencia a tierra Rg (Ohm)	0.001
Estado de los interruptores	Abierto/Cerrado
Tiempo de muestreo (seg)	0

tabla 1- 11 Parámetros del bloque de falta trifásica

CAPÍTULO 2

SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA

CAPÍTULO 2: SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA

2.1 ACTUACIÓN COMO MOTOR

2.1.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina asíncrona trabajando como motor, conectada a la red mediante un transformador de potencia. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y la velocidad angular del rotor.

2.1.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 2-1, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste se compone de cuatro bloques: red, transformador, medidas y máquina asíncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva. El dato de la velocidad angular del rotor se obtendrá del motor asíncrono.

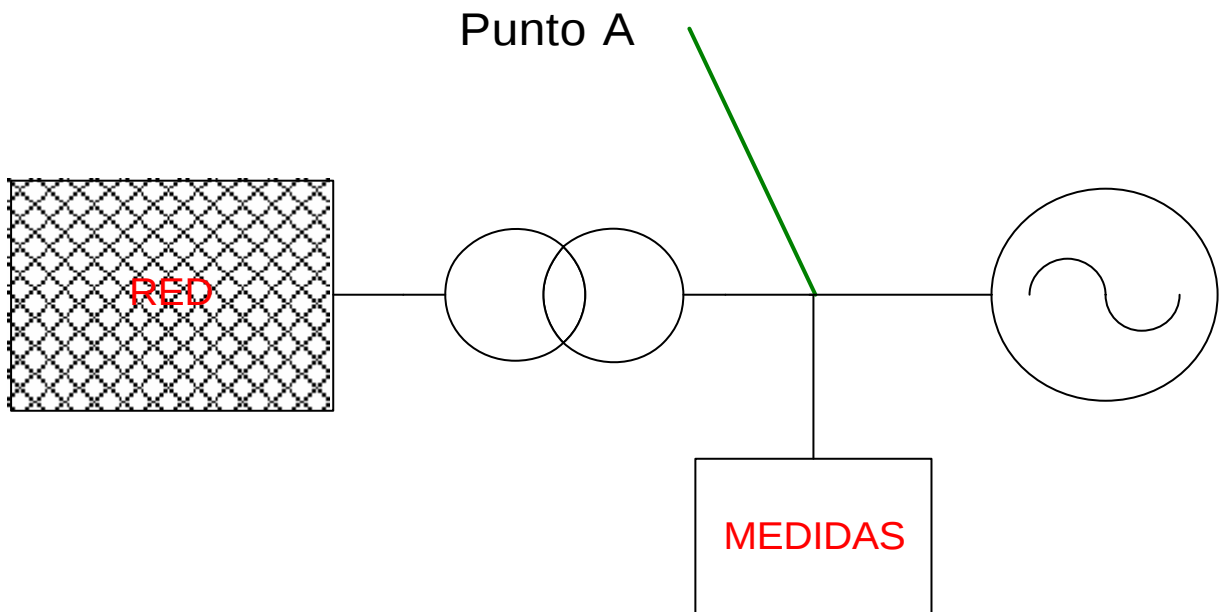


Gráfico 2 - 1 Esquema Unifilar

2.1.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Se definirán a continuación los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. El par que alimenta la máquina es de 3810 N·m.

- BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 2 - 1

- BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	0.75
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.69
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 2 - 2

- BLOQUE DE LA MÁQUINA ASÍNCRONA

PARÁMETROS DEL BLOQUE asynchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	690
Potencia nominal (KVA)	666.6
Resistencia del estator (ohm)	0.0073
Reactancia del estator (H)	0.0002387
Inductancia mutua (H)	0.0103
Resistencia del rotor (ohm)	0.0065
Reactancia del rotor (H)	0.0002864
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	2

Tabla 2 - 3

2.1.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 2.5 seg. Y en ella se podrá observar la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 2-2), la tensión y la intensidad (gráfico 2-3), la velocidad del rotor (gráfico 2-4). Los valores iniciales del valor de deslizamiento, las intensidades que circulan por el estator y los desfases de las intensidades son cero, por lo que entendemos que el rotor se encuentra girando a la velocidad de sincronismo. Una vez pasado el transitorio los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 2-4, y en los gráficos correspondientes.

variables	valores
Tensión de línea (V)	687.8
Intensidad de línea (A)	559.6
Potencia activa (W)	605.3
Potencia reactiva (Var)	279.2
Potencia aparente (VA)	666.6
Velocidad del rotor (rad/s)	155.6

Tabla 2 - 4

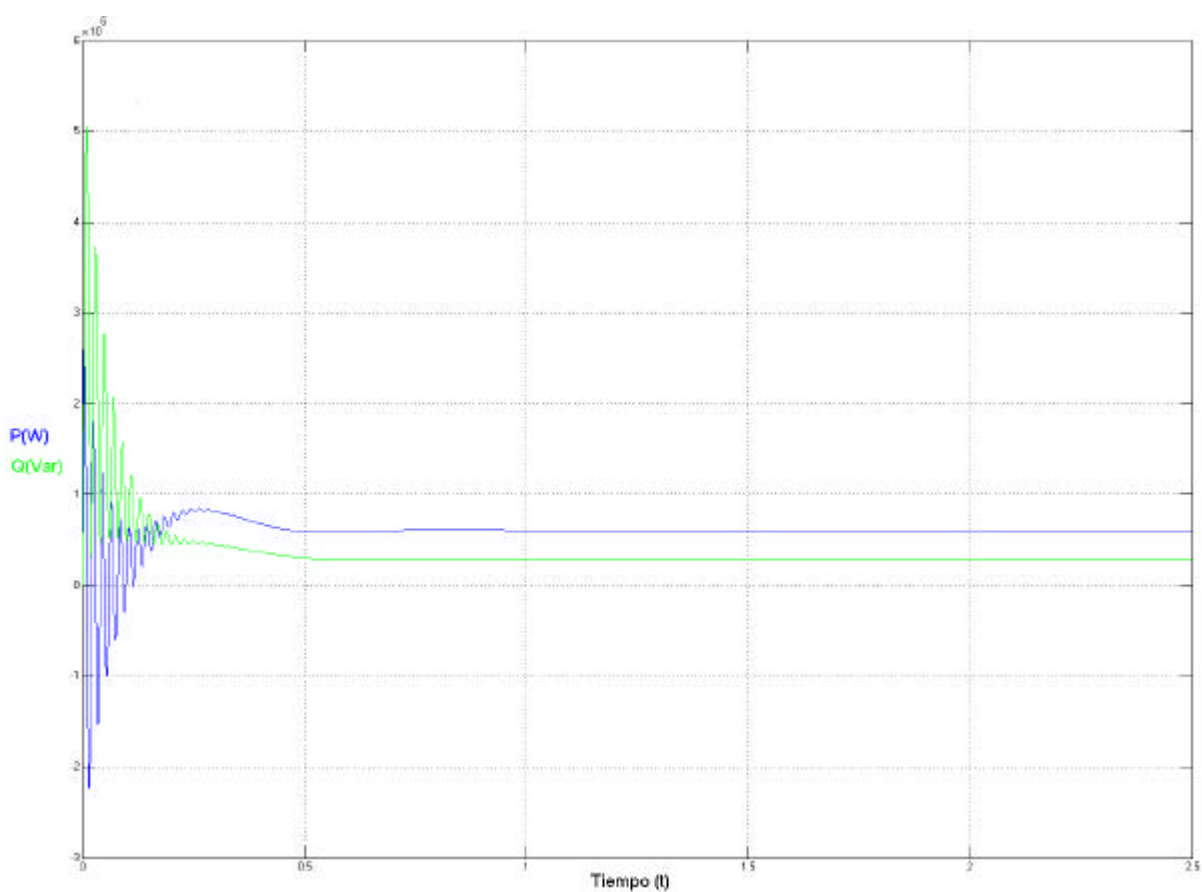


Gráfico 2 - 2 Potencia activa y reactiva

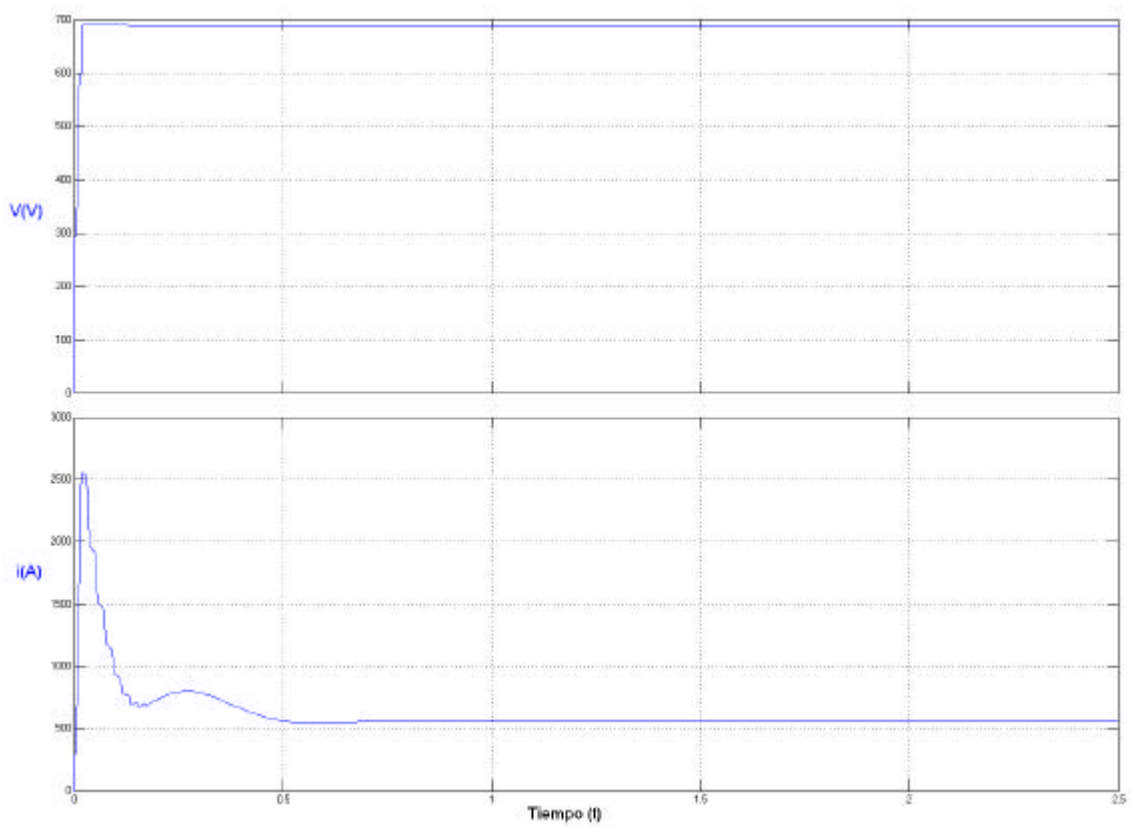


Gráfico 2 - 3 Tensión e intensidad eficaz

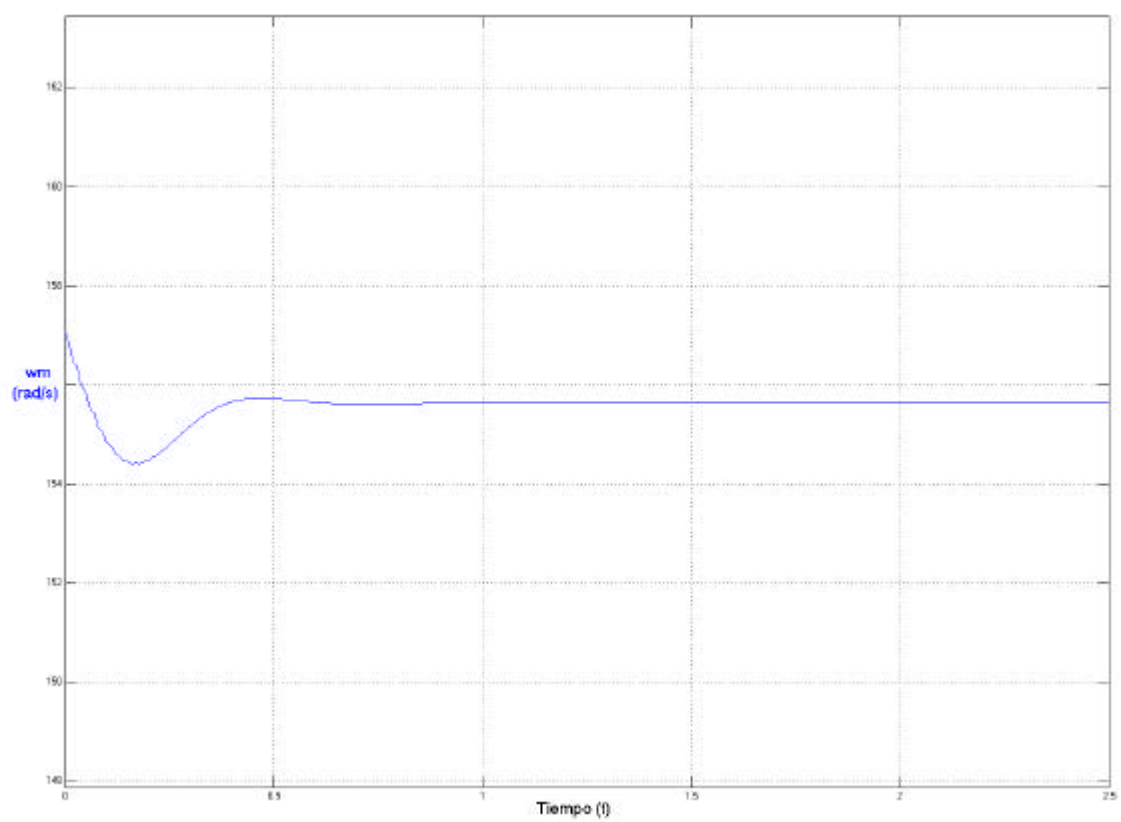


Gráfico 2 - 4 Velocidad del rotor

2.1.5 CONCLUSIONES

De las gráficas expuestas se deduce que la máquina se comporta como motor, puesto la velocidad del rotor está por debajo de la velocidad de sincronismo (157.07 rad/s). En el permanente toda la potencia activa y reactiva que necesita la absorbe de la red, por lo que se justifica el valor positivo de ambas después del transitorio. En el transitorio, la Q y la P absorbida de la red oscila durante 0.2 segundos disminuyendo progresivamente la amplitud de la onda. La intensidad que es elevada al principio, ya que se debe alimentar al campo magnético, disminuye progresivamente hasta llegar al valor nominal.

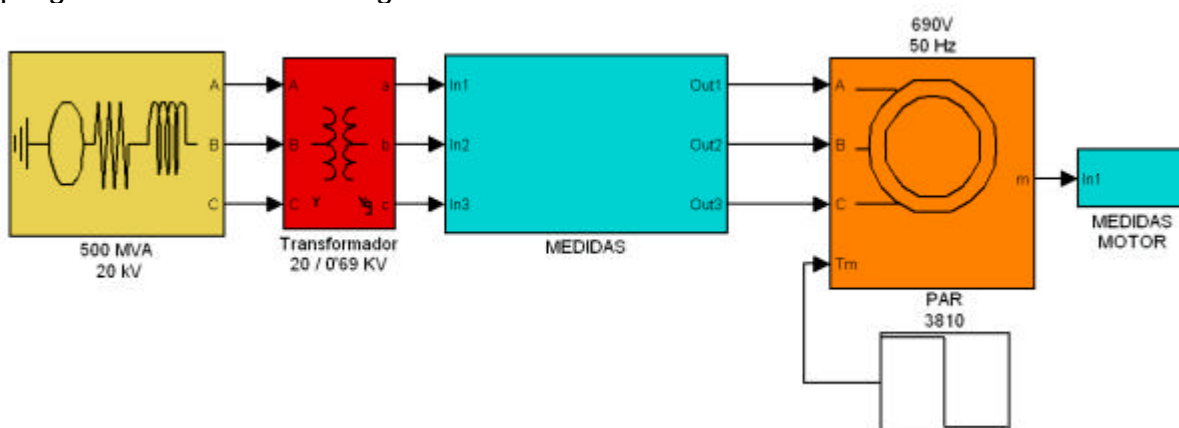


Gráfico 2 – 5 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 2-1

2.2 ACTUACIÓN COMO GENERADOR

2.2.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina asíncrona trabajando como generador, conectada a la red mediante un transformador de potencia. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y la velocidad angular del rotor.

2.2.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar utilizado es el mismo que el utilizado en la simulación 2.1, como se refleja en el gráfico 2-1.

2.2.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques son iguales que la simulación anterior, tal y como se describen en las tablas 2-1, 2-2 y 2-3 ya que se utilizará el mismo modelo pero en este caso el par que alimenta es de -3810 N·m, lo que justificará el comportamiento como generador.

2.2.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 2.5 seg. Y en ella se podrá observar la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 2-6), la tensión y la intensidad (gráfico 2-7), la velocidad del rotor (gráfico 2-8). Los valores iniciales del valor de deslizamiento, las intensidades que circulan por el estator y los desfases de las intensidades son cero. Una vez pasado el transitorio los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 2- 5, y en los gráficos correspondientes.

variables	valores
Tensión de línea (V)	692.2
Intensidad de línea (A)	545.8
Potencia activa (kW)	- 591.9
Potencia reactiva (kVar)	278.9
Potencia aparente (kVA)	654.3
Velocidad del rotor (rad/s)	158.45

Tabla 2 – 5

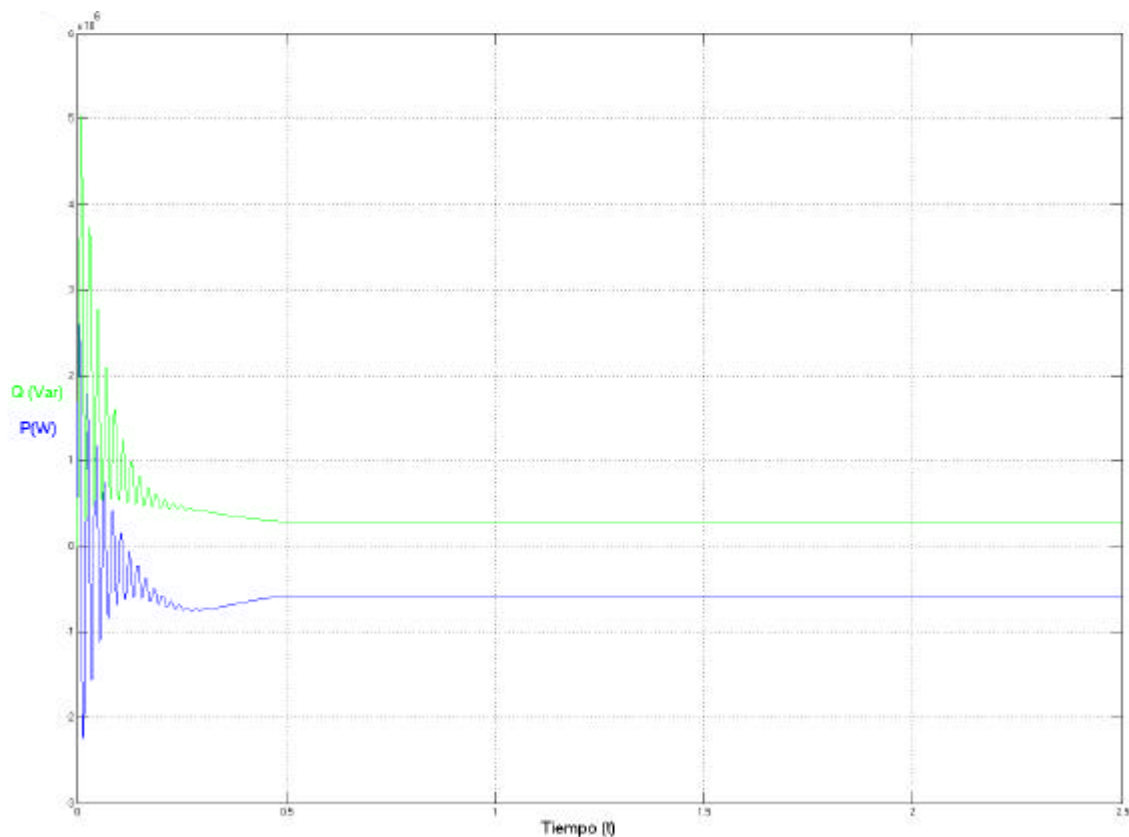


Gráfico 2 – 6 Potencia activa y reactiva

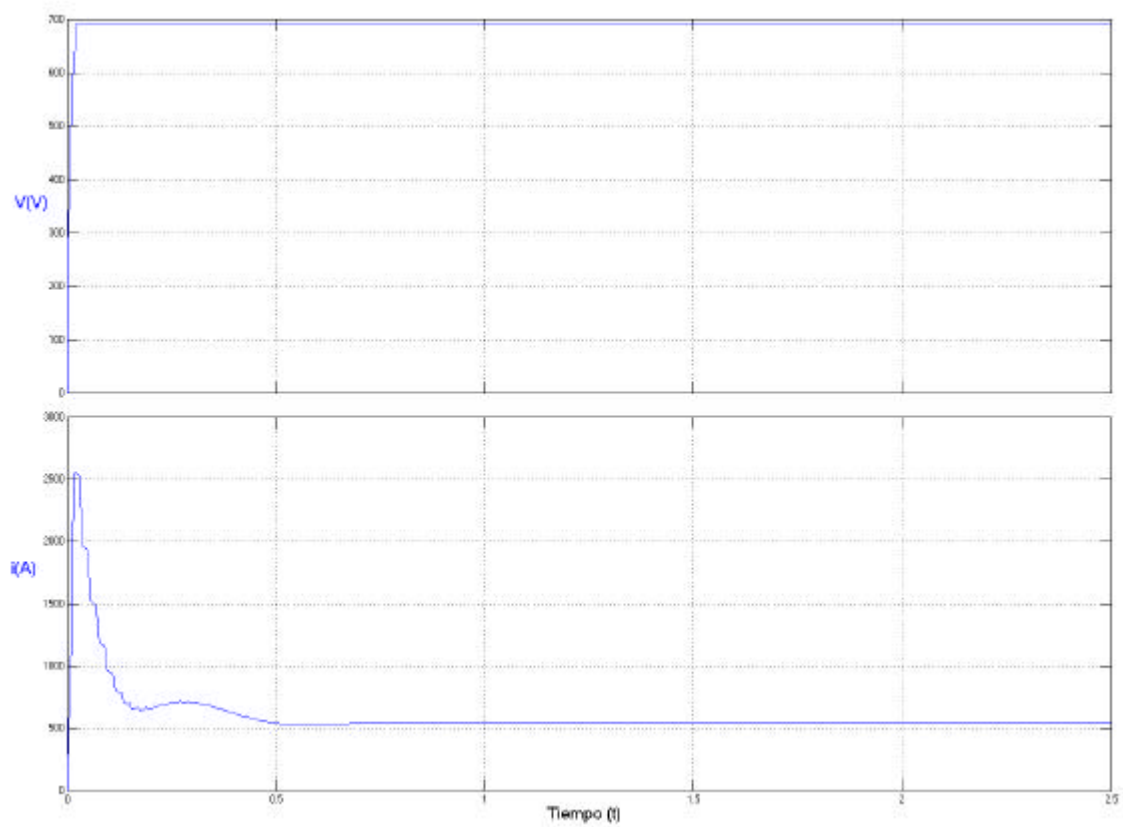


Gráfico 2 – 7 Tensión e intensidad eficaz

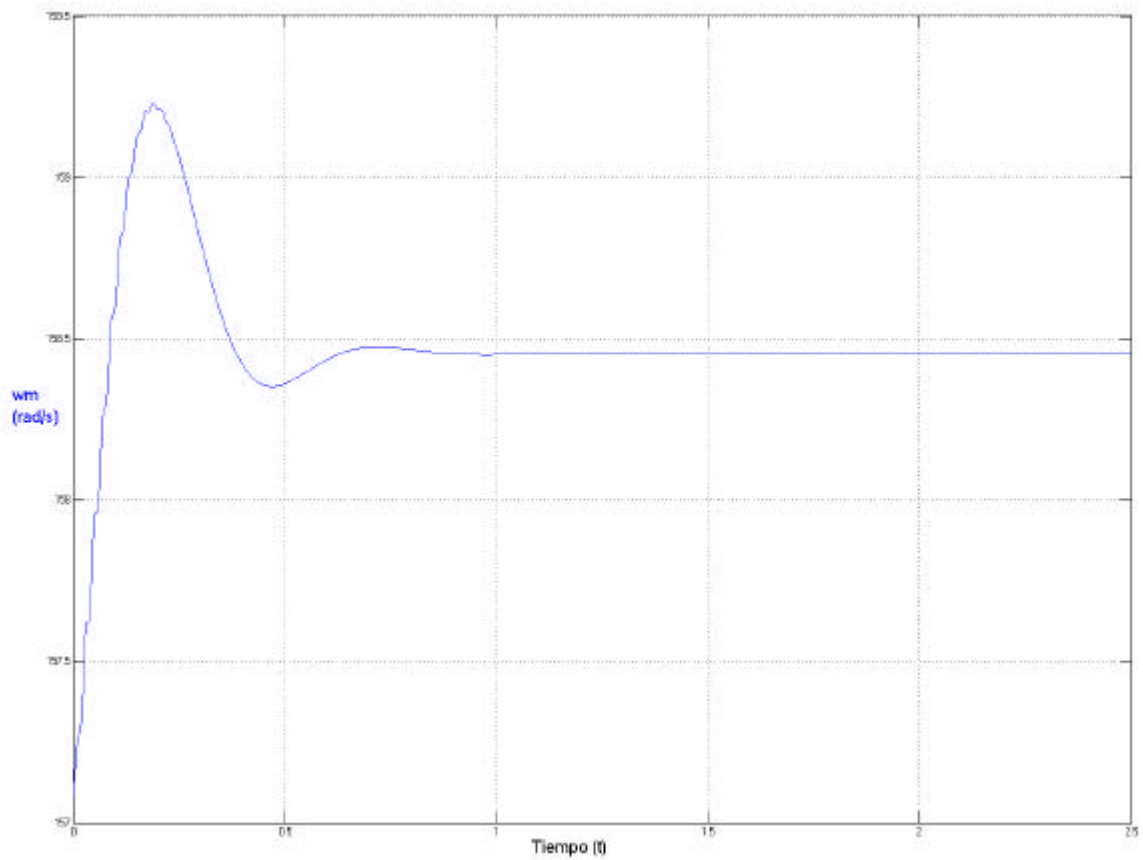


Gráfico 2 – 8 Velocidad del rotor

2.2.5 CONCLUSIONES

De la gráfica 2-8 se extrae la conclusión de que la máquina trabaja como generador, puesto que la velocidad del rotor está por encima de la velocidad de sincronismo. Esta simulación modela el comportamiento en régimen permanente de un molino de viento, donde el molino cede potencia activa y absorbe reactiva. En el gráfico 2-9 se observa el esquema empleado en el programa *Simulink*.

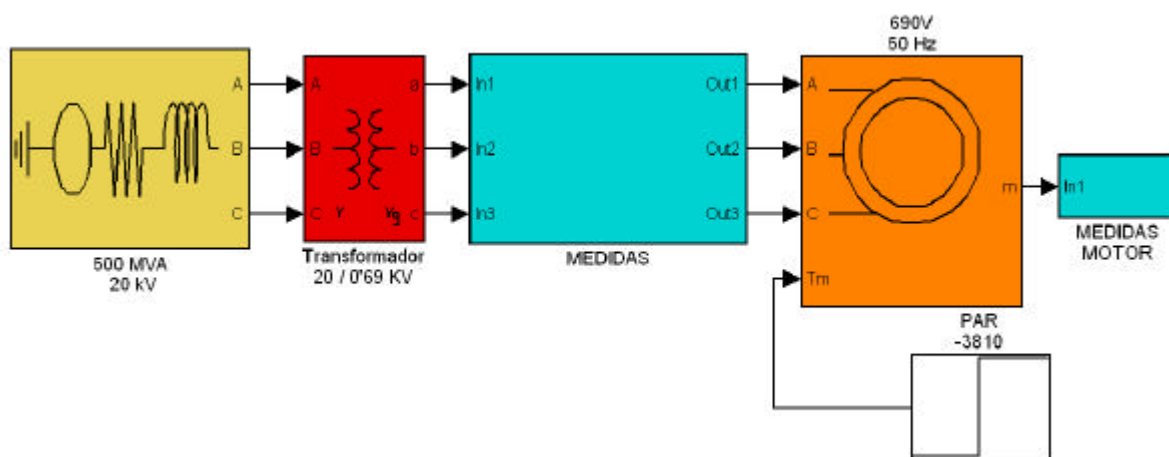


Gráfico 2 – 9 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 2-2

2.3 ACTUACIÓN TRANSITORIA DE MOTOR A GENERADOR

2.3.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento dinámico de una máquina asíncrona trabajando primero como motor y posteriormente como generador; conectada a la red mediante un transformador de potencia. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva, la velocidad angular del rotor y las intensidades rotóricas de la máquina.

2.3.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar utilizado es el mismo que el utilizado en la simulación 2.1, como se refleja en el gráfico 2-1.

2.3.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques son iguales que la simulación anterior, tal y como se describen en las tablas 2-1, 2-2 y 2-3 ya que se utilizará el mismo modelo pero en este caso el par que alimenta a la maquina pasará de un valor de 3810 N·m a -3810 N·m.

2.3.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 2.5 segundos produciéndose en el segundo 1.25 un cambio en el par. Y en ella se podrá observar la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 2-10), la tensión y la intensidad (gráfico 2-11), la velocidad del rotor (gráfico 2-12) y las intensidades rotóricas y estatóricas (gráfico 2-13 a). Los valores iniciales del valor de deslizamiento, las intensidades que circulan por el estator y los desfases de las intensidades son cero.

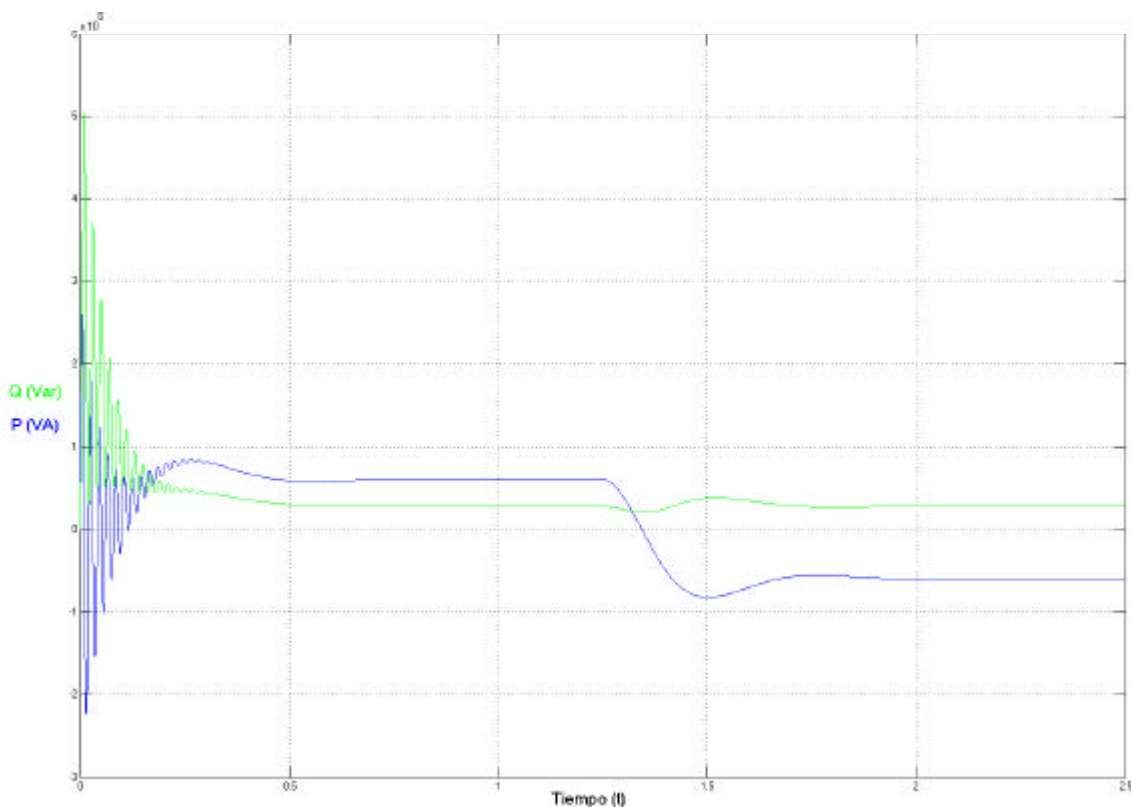


Gráfico 2 – 10 Potencia activa y reactiva

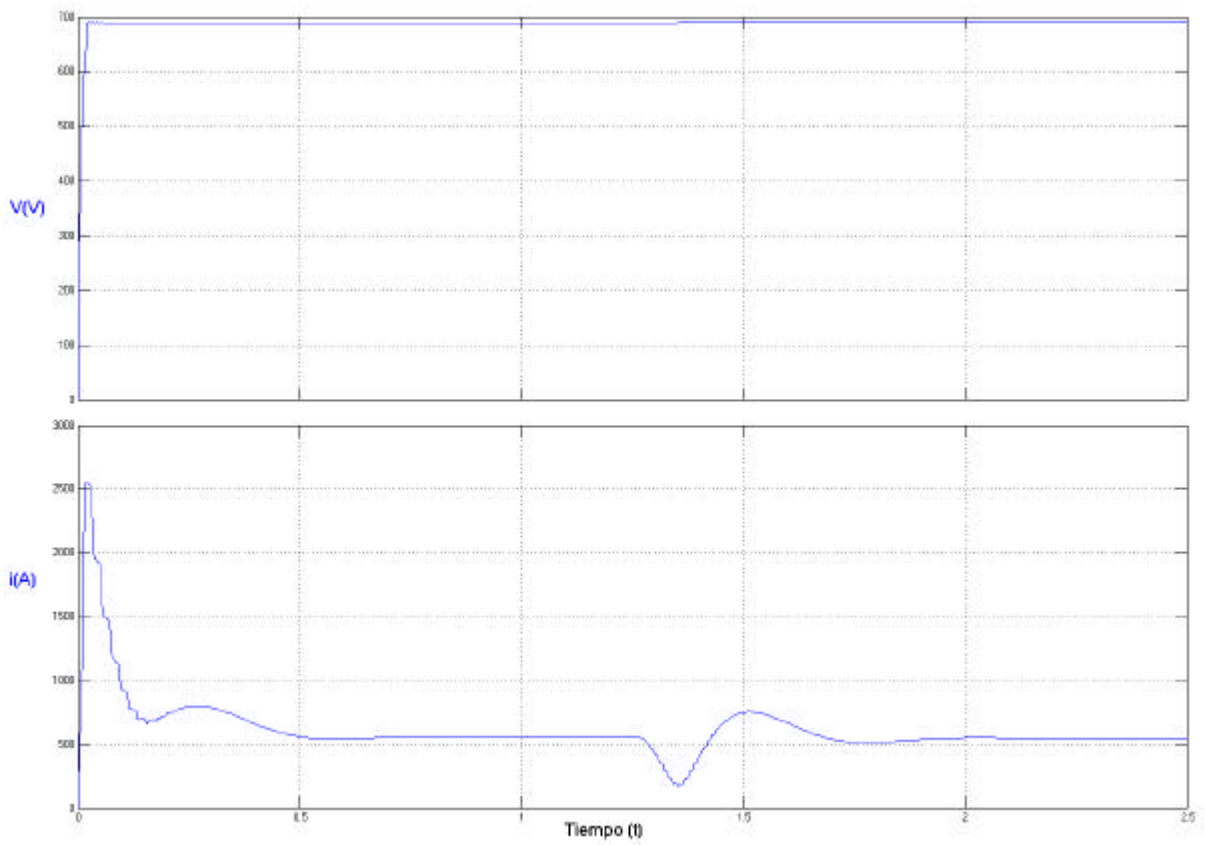


Gráfico 2 – 11 Tensión e intensidad eficaz

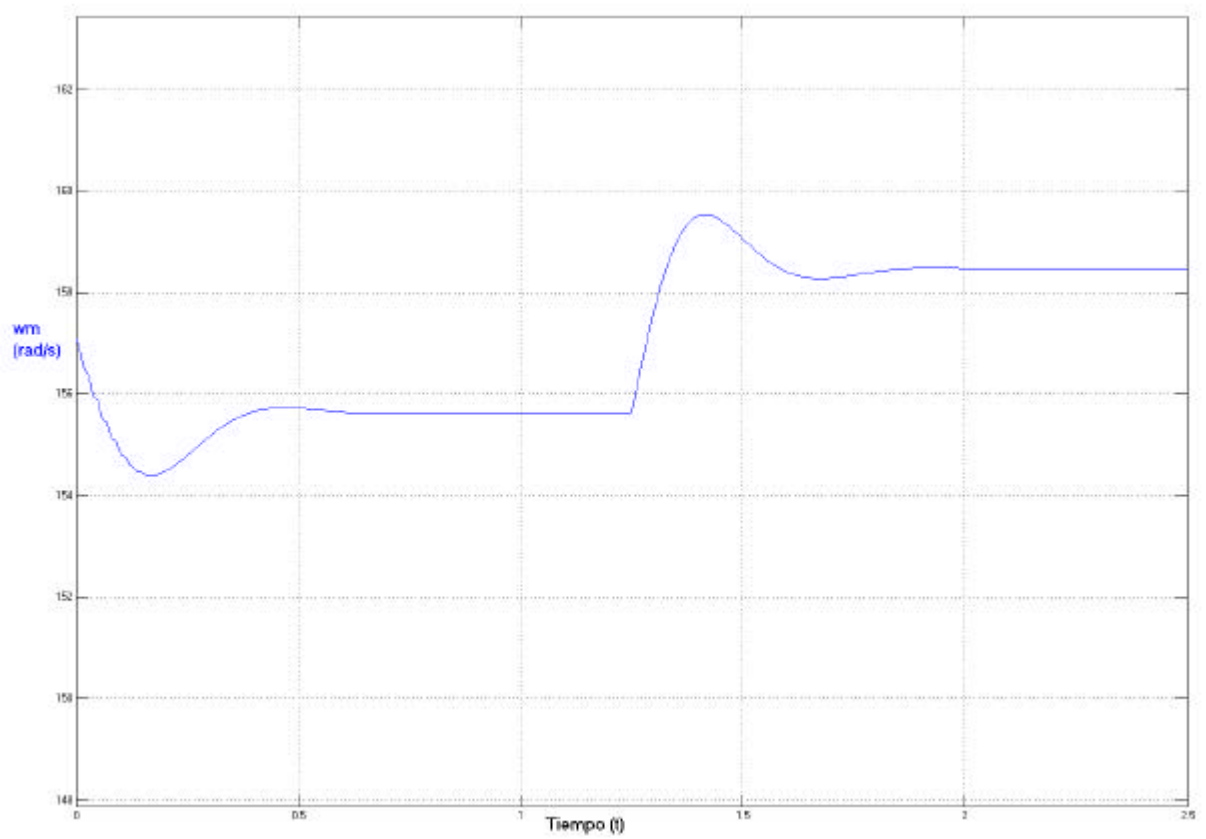


Gráfico 2 – 12 Velocidad del rotor

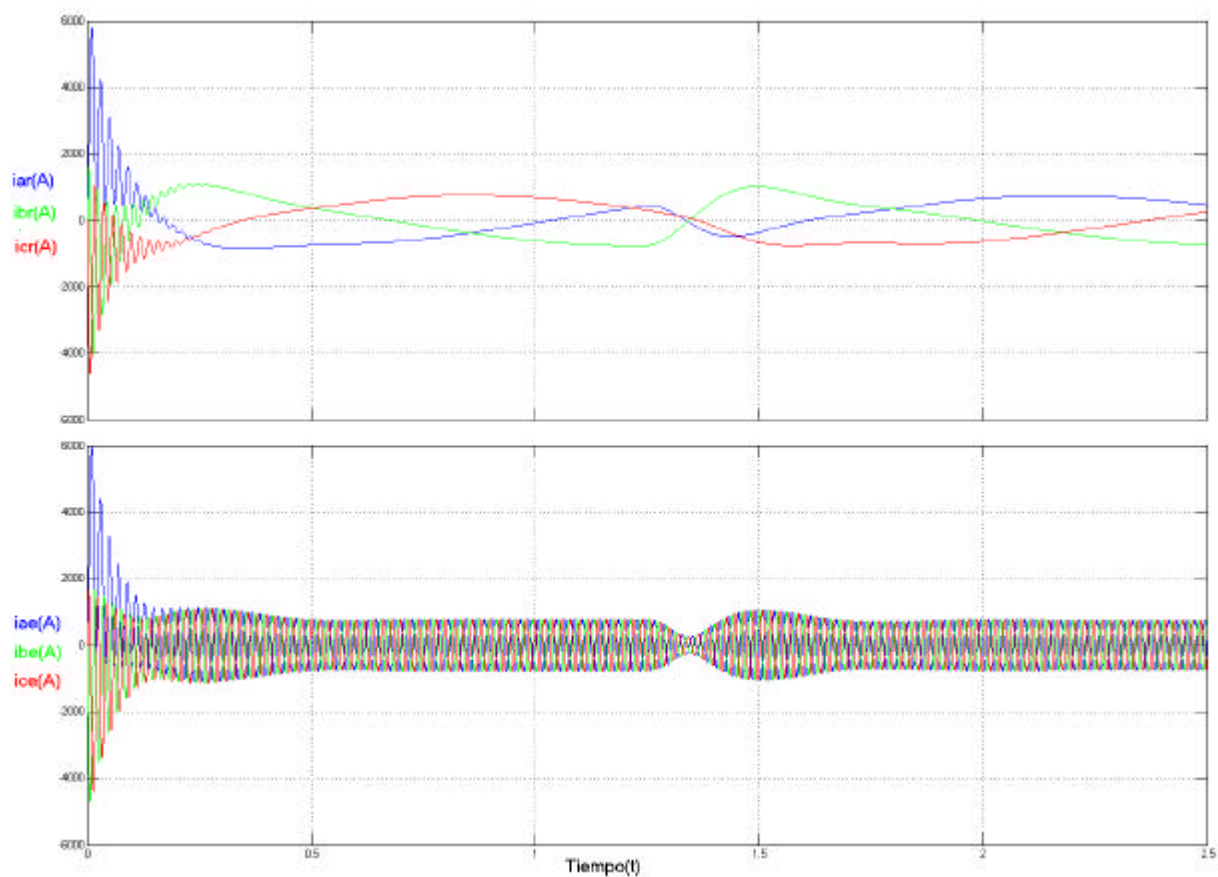


Gráfico 2 – 13 a Intensidades rotóricas y estatóricas de la máquina asíncrona

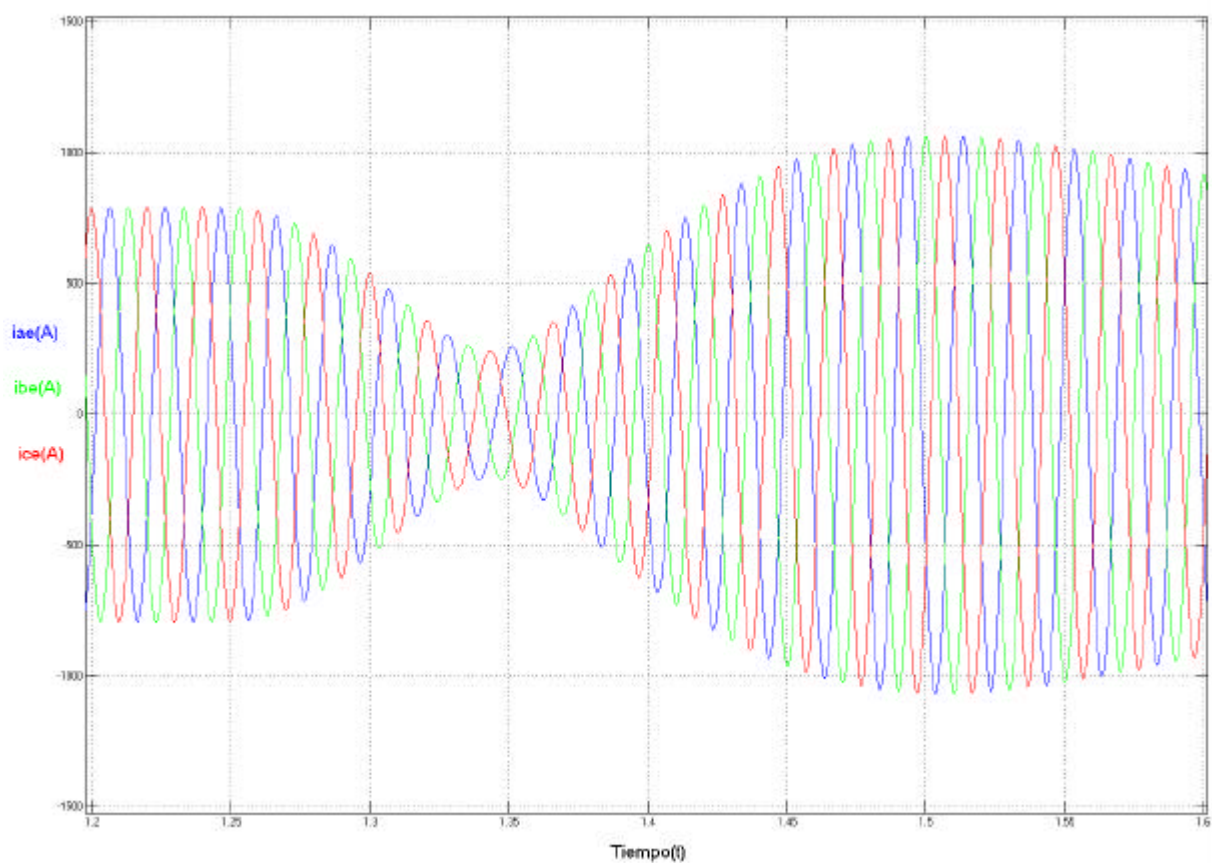


Gráfico 2 – 13 b Ampliación Intensidades estatóricas de la máquina asíncrona

2.3.5 CONCLUSIONES

En la gráfica 2-13 a se observa el fenómeno de transposición de fases que se produce en el rotor de la máquina asíncrona cuando se produce el paso de funcionamiento motor a generador. En el gráfico 2-10, en el segundo 1.25 cuando se produce el cambio de par, la máquina pasa de absorber potencia activa de la red a cederla. En el gráfico 2-12 que representa la velocidad del rotor se justifica el cambio de motor a generador. Los resultados de la simulación son los mismos que en los casos anteriores 2.1 y 2.2; sólo varía cuando se produce el cambio de par.

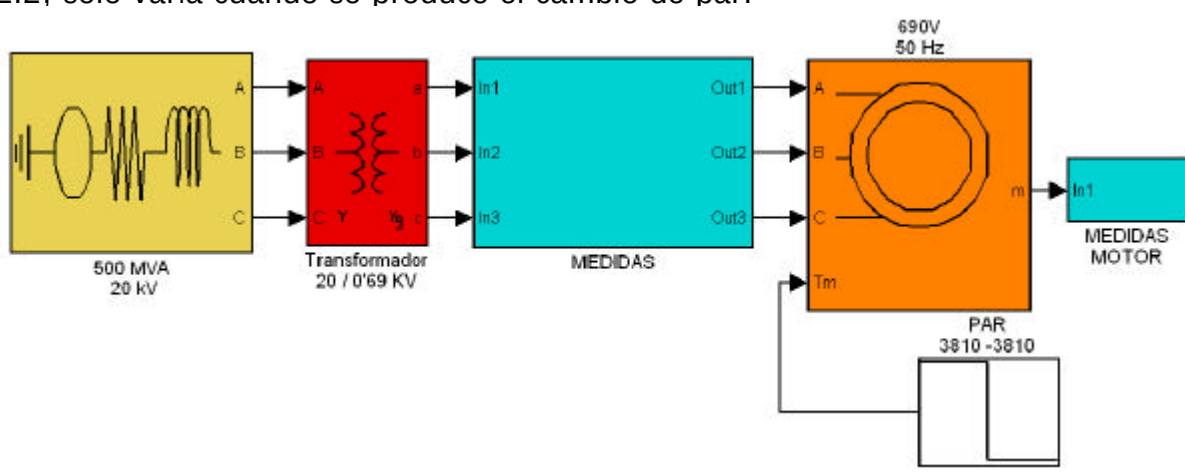


Gráfico 2 – 14 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 2-3

En el gráfico 2-15 se puede observar como en esta simulación evoluciona la característica de par y de deslizamiento de un estado motor a otro generador.

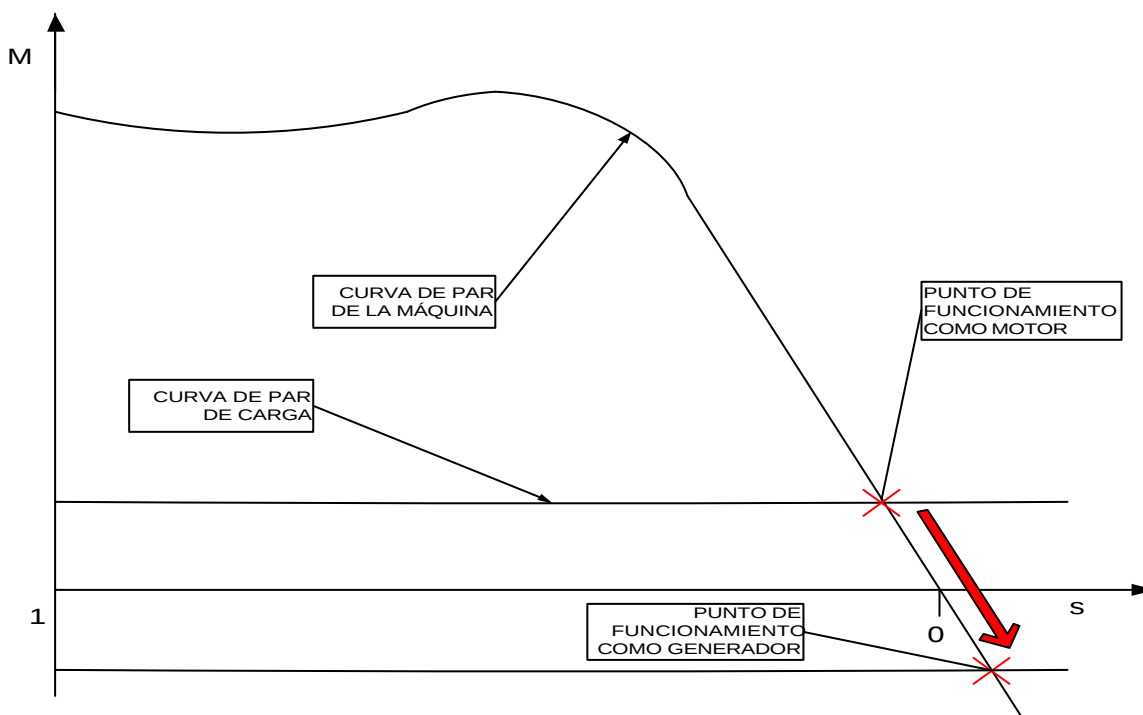


Gráfico 2 – 15 Evolución de la curva de Par de la máquina asíncrona

2.4 ACTUACIÓN COMO MOTOR Y GENERADOR CON PERTURBACIÓN EN EL PAR

2.4.1 OBJETO

Estudiar la influencia que tiene las perturbaciones en el par en la máquina asíncrona trabajando primero como motor y posteriormente como generador, sobre las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva, velocidad angular y par.

2.4.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar utilizado es el mismo que el utilizado en la simulación 2.1, como se refleja en el gráfico 2-1.

2.4.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques son iguales que la simulación anterior, tal y como se describen en las tablas 2-1, 2-2 y 2-3 ya que se utilizará el mismo modelo pero en este caso, (como en el anterior 2-3) el par que alimenta a la máquina pasará de un valor de 3810 N·m a -3810 N·m, pero a estos valores se le multiplicará una onda aleatoria cuadrada que simulará las perturbaciones que se producen en el par. Los valores entre los que oscila dicha onda cuadrada vienen definidos en la tabla 2-6.

PARÁMETROS DEL BLOQUE uniform random number	valores
Mínimo	0.8
Máximo	1.1
Tiempo de muestreo (seg)	0.1
Valor inicial	0

tabla 2- 6 Parámetros del bloque del par constante

2.4.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 5 segundos produciéndose en el segundo 2.5 un cambio en el par. Y en ella se podrá observar la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 2-16), la tensión y la intensidad (gráfico 2-17), la velocidad del rotor (gráfico 2-18). Los valores iniciales del valor de deslizamiento, las intensidades que circulan por el estator y los desfases de las intensidades son cero.

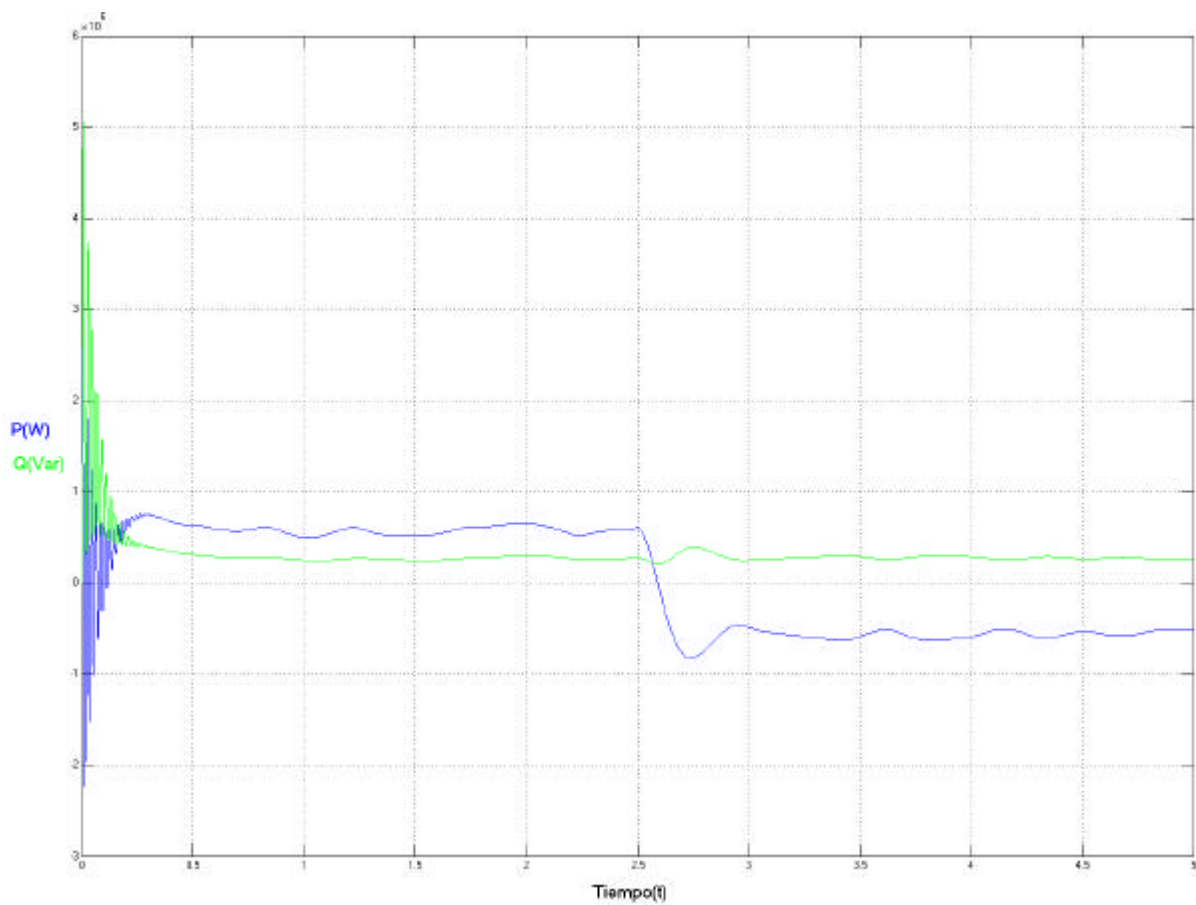


Gráfico 2 – 16 Potencia activa y reactiva

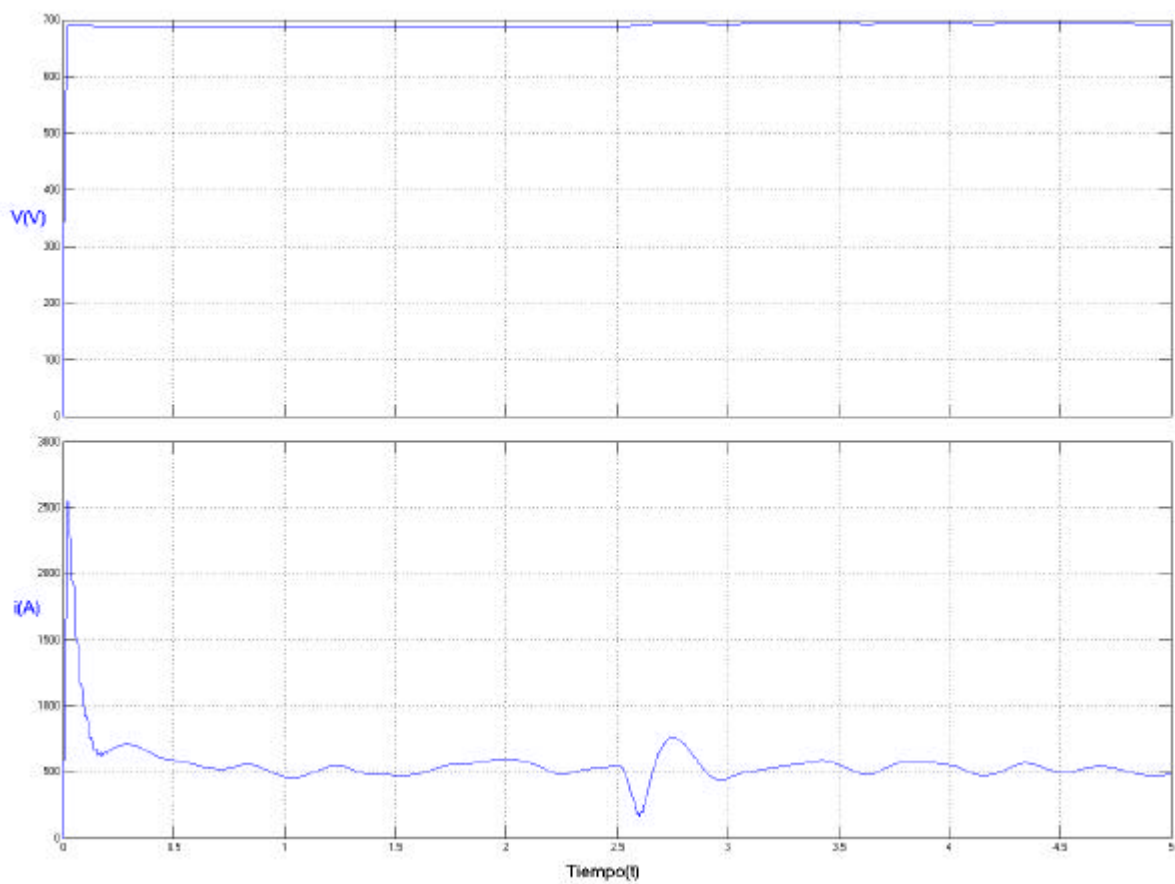


Gráfico 2 – 17 Tensión e intensidad eficaz

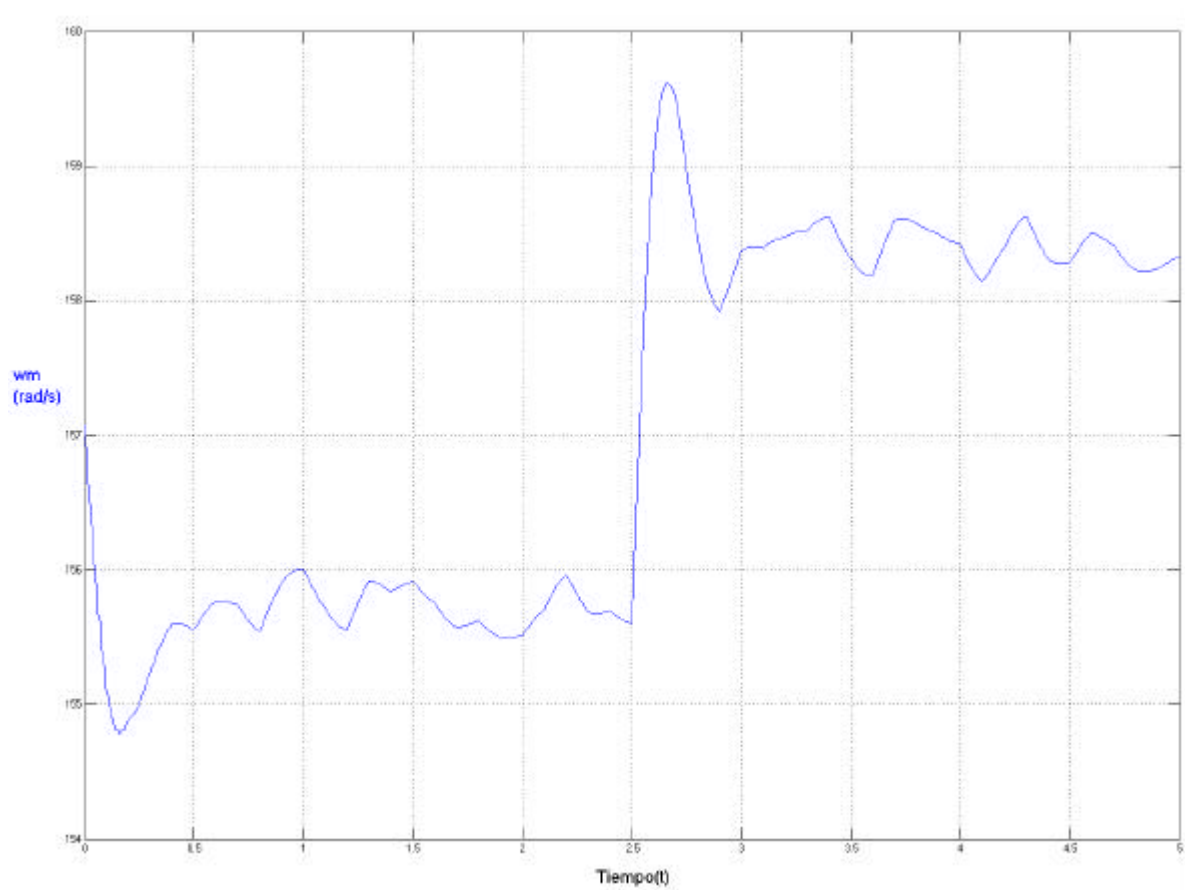


Gráfico 2 – 18 Velocidad del rotor

2.4.5 CONCLUSIONES

En todas las gráficas se puede observar de forma clara como afectan dichas perturbaciones, provocando que los valores no sean constantes cuando llegan al permanente como en la simulación 2-3, sino que los valores se van modificando según el valor del par en cada momento. Estas perturbaciones dado que la máquina asíncrona está conectada rígidamente a la red se transmiten al sistema eléctrico.

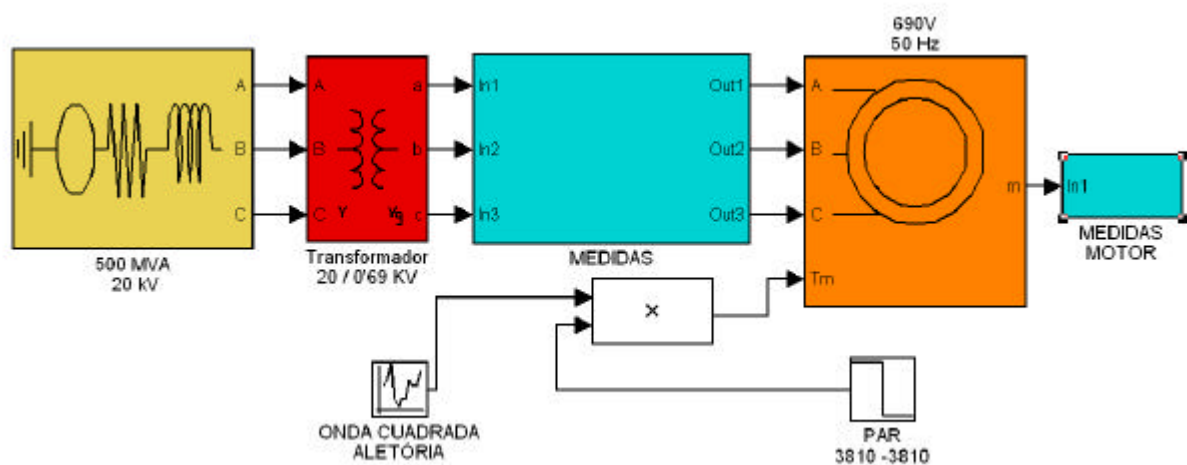


Gráfico 2 – 19 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 2-4

2.5 ACTUACIÓN COMO MOTOR Y GENERADOR CON BATERÍA DE CONDENSADORES

2.5.1 OBJETO

Ver la mejora del factor de potencia por parte de la máquina asíncrona, cuando se instala una batería de condensadores. Evolución de la potencia reactiva.

2.5.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema que utilizaremos para esta simulación será el que se observa en el gráfico 2-20. Se ha introducido una batería de condensadores, en el punto B, para mejorar el factor de potencia de la máquina asíncrona.

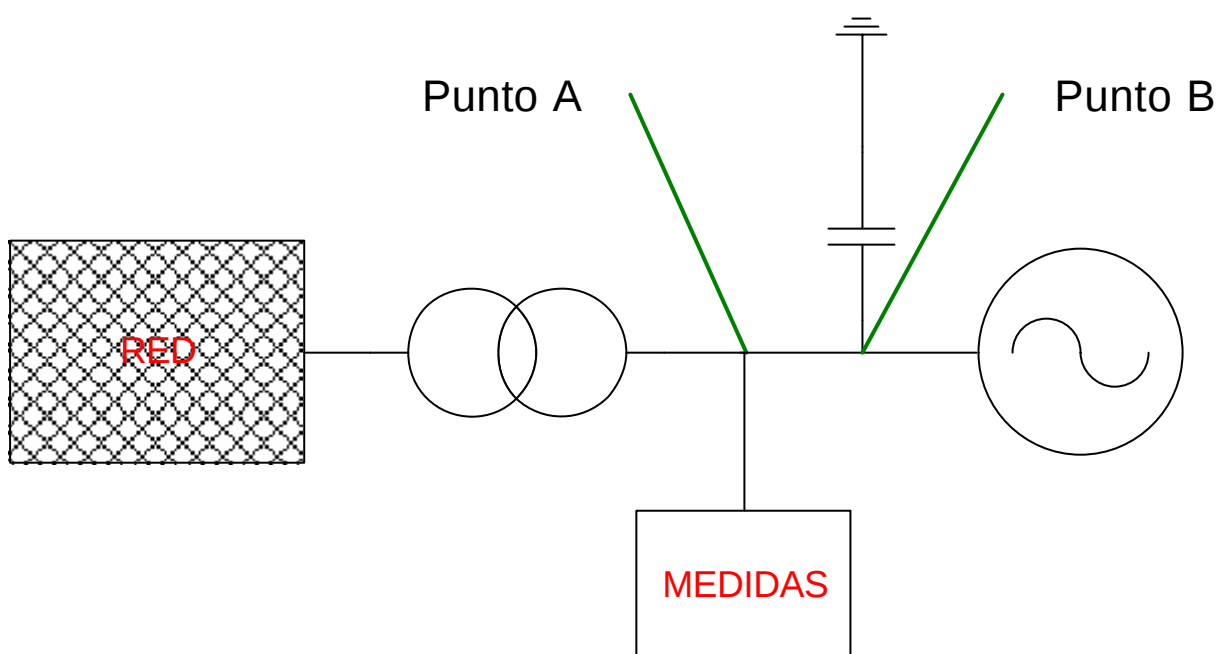


Gráfico 2 - 20 Esquema Unifilar con batería de condensadores.

2.5.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

La batería de condensadores que pretendemos instalar, consta de una potencia reactiva de 270 kVar, que es aproximadamente el valor que demanda la máquina asíncrona de la red. En este caso se ha dispuesto de una batería estática, pero en el mercado ya existen baterías que realizan una regulación continua sin saltos que asegura una gran precisión, manteniéndose un valor de factor de potencia según el valor de consigna especificado.

Los valores de los parámetros utilizados para el bloque que modela la batería de condensadores se pueden observar en la tabla 2-7.

▪ BLOQUE DE BATERÍA DE CONDENSADORES

PARÁMETROS DEL BLOQUE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión nominal (V)	690
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa (W)	0
Potencia reactiva inductiva (VAR)	0
Potencia reactiva capacitiva (VAR)	$270 \cdot 10^3$

Tabla 2- 7

2.5.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 2.5 segundos produciéndose en el segundo 1.25 un cambio en el par. Y en ella se podrá observar la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 2-21). Los valores iniciales del valor de deslizamiento, las intensidades que circulan por el estator y los desfases de las intensidades son cero.

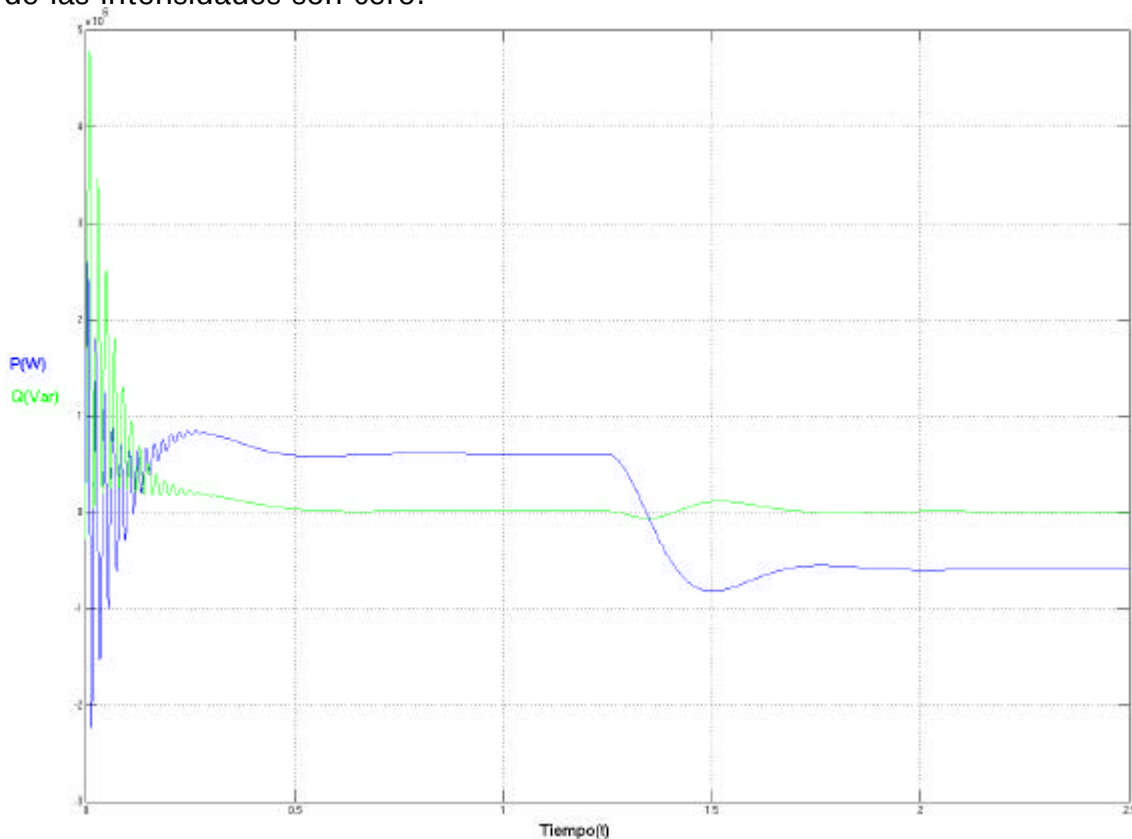


Gráfico 2 – 21 Potencia activa y reactiva.

2.5.5 CONCLUSIONES

En la gráfica 2-21 se puede observar como la potencia reactiva que la máquina absorbe de la red disminuye hasta valores cercanos a 0. Con esta medida se disminuye la intensidad que circula por las líneas, con lo que se tendrá una mayor capacidad en éstas para transmitir potencia. Los valores obtenidos en la simulación son los siguientes:

variables	valores
Potencia reactiva como motor (Var)	11520
Potencia reactiva como generador(Var)	7242

Tabla 2 - 8

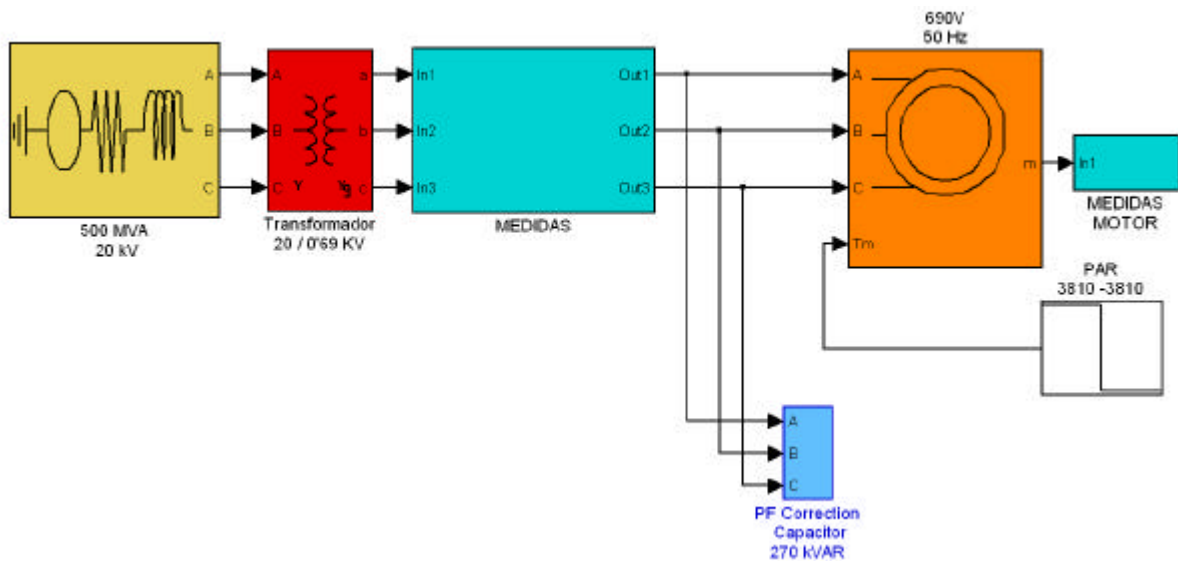


Gráfico 2 – 22 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 2-5

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

3.1 ACTUACIÓN COMO MOTOR

3.1.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina síncrona trabajando como un motor conectado a la red mediante un transformador de potencia. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa y potencia reactiva.

3.1.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado es el que se observa en el gráfico 3-1. Este unifilar, como en el del caso de la máquina asíncrona se compone de cuatro bloques: red, transformador, medidas y máquina síncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión e intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

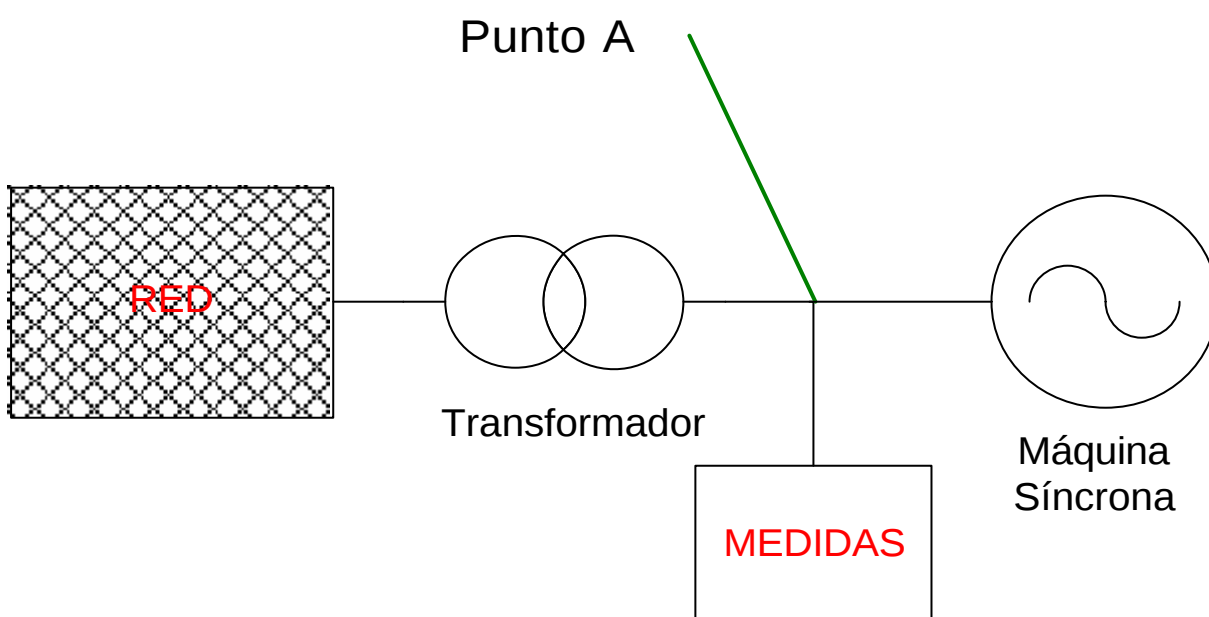


Gráfico 3 - 2 Esquema Unifilar.

3.1.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

A continuación se definirán los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación, haciendo especial hincapié en el bloque *Powergui* que es el encargado de realizar un flujo de cargas previo a la simulación determinando los parámetros de inicio del sistema.

- BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 3 - 5.

- BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	0.75
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.4
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 3 - 6.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR SÍNCRONO

PARÁMETROS DEL BLOQUE synchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Polos salientes
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	400
Potencia nominal (KVA)	600
Resistencia del estator (pu)	0.00285
Reactancia del estator (pu)	0.114
Reactancia mutua del estator eje d (pu)	1.19
Reactancia mutua del estator eje q (pu)	0.36
Resistencia de campo (pu)	0.000579
Reactancia de campo (pu)	0.114
Resistencia amortiguadora eje d (pu)	0.0117
Reactancia amortiguadora eje d (pu)	0.182
Resistencia amortiguadora eje q (pu)	0.0197
Reactancia amortiguadora eje q (pu)	0.384
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	20

Tabla 3 - 7.

La máquina síncrona es un convertidor mecánico de excitación múltiple. El devanado rotórico está alimentado por corriente continua, generando un campo magnético cuya inducción a lo largo del entrehierro será senoidal. Mediante un par exterior se hace girar al rotor a velocidad constante por lo que el flujo concatenado con la bobina del estator será también senoidal.

De todo ello se deduce que nuestro modelo en *Simulink* debe tener dos entradas; una que indique la potencia mecánica que se le va a suministrar al rotor y otra para especificar la tensión de excitación. Estos valores se pueden introducir al bloque de la máquina síncrona mediante constantes o mediante un bloque de excitación en el caso de la tensión, o mediante bloques de control referidos a una turbina de vapor o hidráulica para el caso de la potencia mecánica.

El bloque *Powergui* de la biblioteca de *Simulink* en su apartado referido a sistemas de potencia ("*SimPowerSystem*") nos permite establecer condiciones de funcionamiento a la hora de realizar simulaciones. Dentro del bloque en la pestaña "*Load Flow and Machine Inicializacion*", flujo de cargas y valores iniciales, encontramos un menú con las siguientes opciones:

- Realizar un flujo de cargas.
- Establecer las condiciones iniciales.
- Establecer los parámetros que dejamos fijos en la simulación y su valor:
 - P - V
 - P - Q
- Frecuencia de la simulación.

Una vez definidos los valores P – V o P – Q y realizado el flujo de carga, obtenemos los valores en p.u. que debemos de poner en la entrada del bloque de la máquina síncrona de potencia mecánica y tensión de excitación.

Esta será la metodología empleada para cada simulación de este capítulo. Las condiciones iniciales vendrán definidas por el flujo de cargas realizado.

Para estas simulaciones los valores de excitación y de potencia mecánica serán introducidos mediante constantes.

Los valores iniciales vendrán dados por el flujo de carga realizado por el bloque *Powergui* siendo los parámetros especificados para la simulación los descritos en la tabla 3- 4.

variables	valores
Potencia activa (kW)	-580
Potencia reactiva (Var)	0
Potencia mecánica (p.u.)	-0.9667
Tensión de excitación (p.u.)	1.433

Tabla 3 - 8

3.1.4 RESULTADOS

La simulación se ejecuta durante 2.5 seg. y en ella se observa la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 3-2) y la tensión e intensidad (gráfico 3-3). Una vez pasado el transitorio los resultados se expresan en la tabla 3- 5.

variables	valores
Tensión de línea (V)	398.8
Intensidad de línea (A)	839.8
Potencia activa (kW)	580
Potencia reactiva (Var)	9.087
Potencia aparente (kVA)	580.1

Tabla 3 - 5

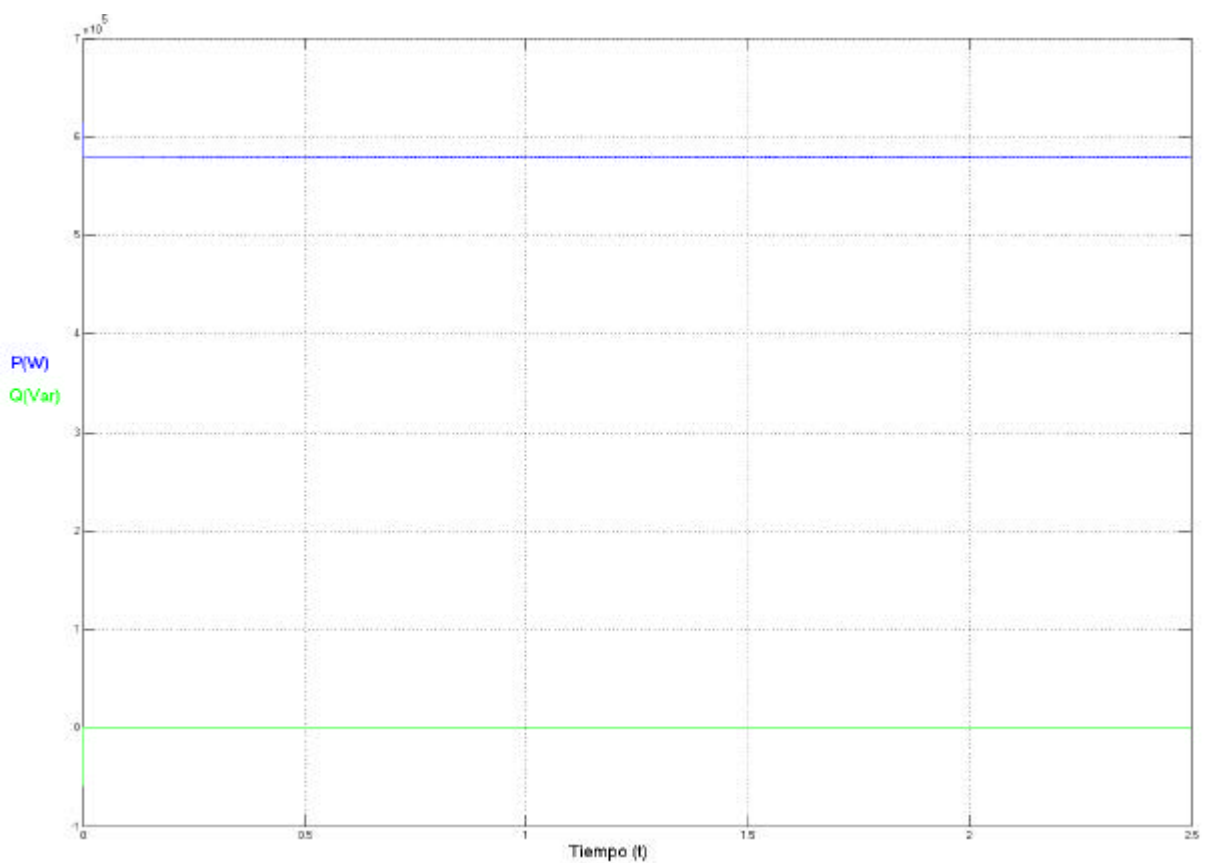


Gráfico 3 - 2 Potencia activa y reactiva.

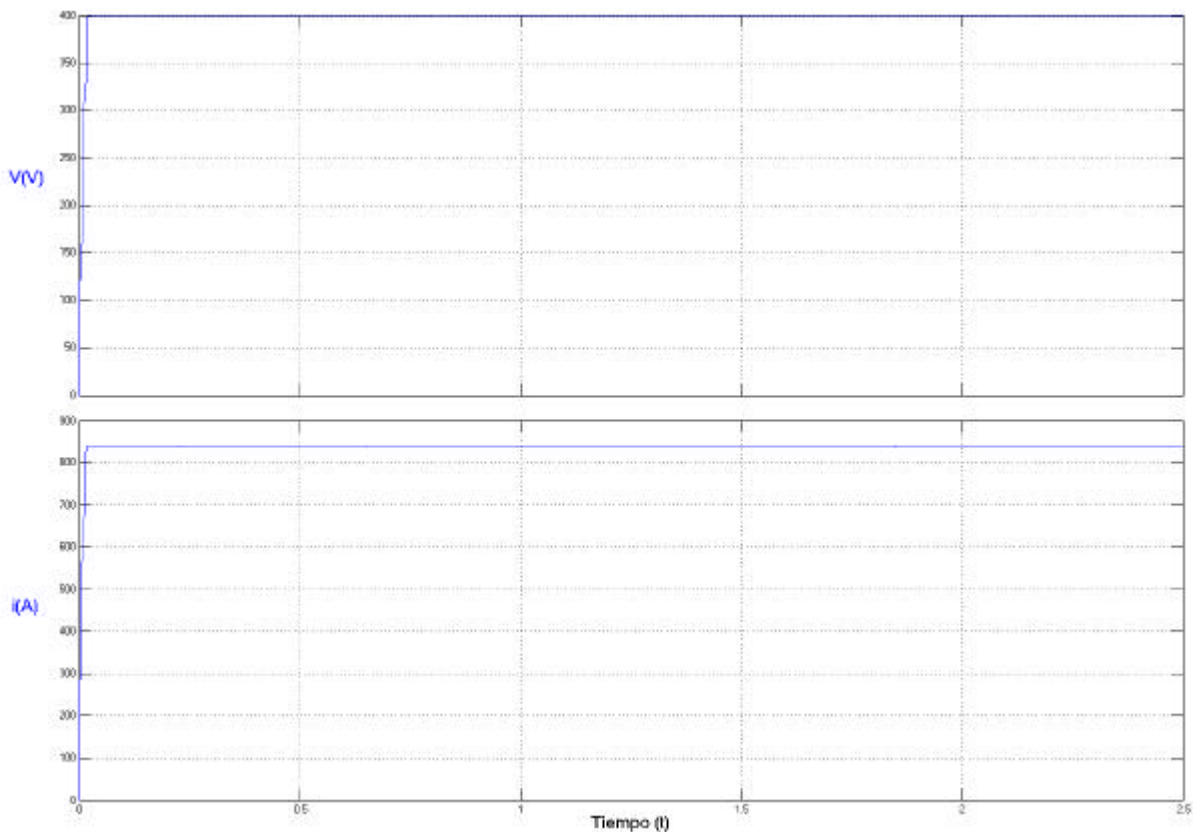


Gráfico 3 - 3 Tensión e intensidad eficaz.

3.1.5 CONCLUSIONES

En los gráficos 3-2 y 3-3 se observa la evolución de la máquina síncrona como motor. Los resultados obtenidos se ajustan a las condiciones establecidas siendo la evolución muy estable. La tensión en bornas de la máquina es inferior a la tensión en el secundario del transformador, lo que justificaría el flujo de potencia de la red hacia la máquina síncrona. En el gráfico 3-4 se puede ver el esquema empleado en *Simulink*.

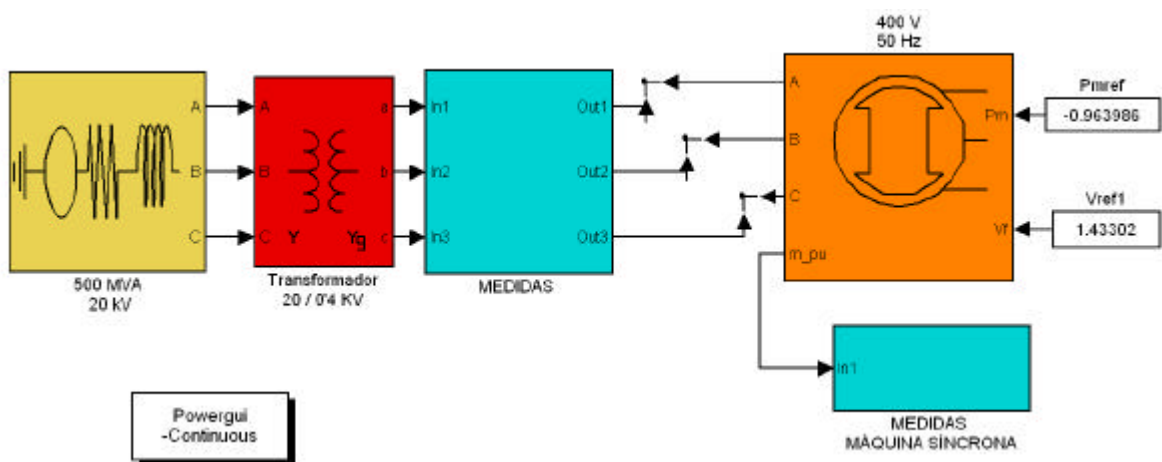


Gráfico 3 – 4 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 3-1.

3.2 ACTUACIÓN COMO GENERADOR

3.2.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina síncrona trabajando como generador y conectada a la red mediante un transformador de potencia. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva.

3.2.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar utilizado es el mismo que el utilizado en la simulación 3.1, como se refleja en el gráfico 3-1.

3.2.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques son iguales que la simulación anterior (simulación 3.1), tal y como se describen en las tablas 3-1, 3-2 y 3-3 ya que se utilizará el mismo modelo, cambiando únicamente el sentido de la potencia activa, ya que en esta ocasión será la máquina síncrona quien la ceda potencia activa a la red.

Los valores iniciales vendrán dados por el flujo de carga realizado por el bloque *Powergui* siendo los parámetros especificados para la simulación los descritos en la tabla 3- 6.

variables	valores
Potencia activa (kW)	580
Potencia reactiva (Var)	0
Potencia mecánica(p.u.)	0.9693
Tensión de excitación (p.u.)	1.435

Tabla 3 - 6

3.2.4 RESULTADOS

La simulación se ejecuta durante 2.5 seg. Y en ella se observa la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 3-5) y la tensión e intensidad (gráfico 3-6). Una vez pasado el transitorio los resultados se expresan en la tabla 3- 5.

variables	valores
Tensión de línea (V)	401.4
Intensidad de línea (A)	834.4
Potencia activa (kW)	- 580.1
Potencia reactiva (Var)	30.59
Potencia aparente (kVA)	580.1

Tabla 3 – 5

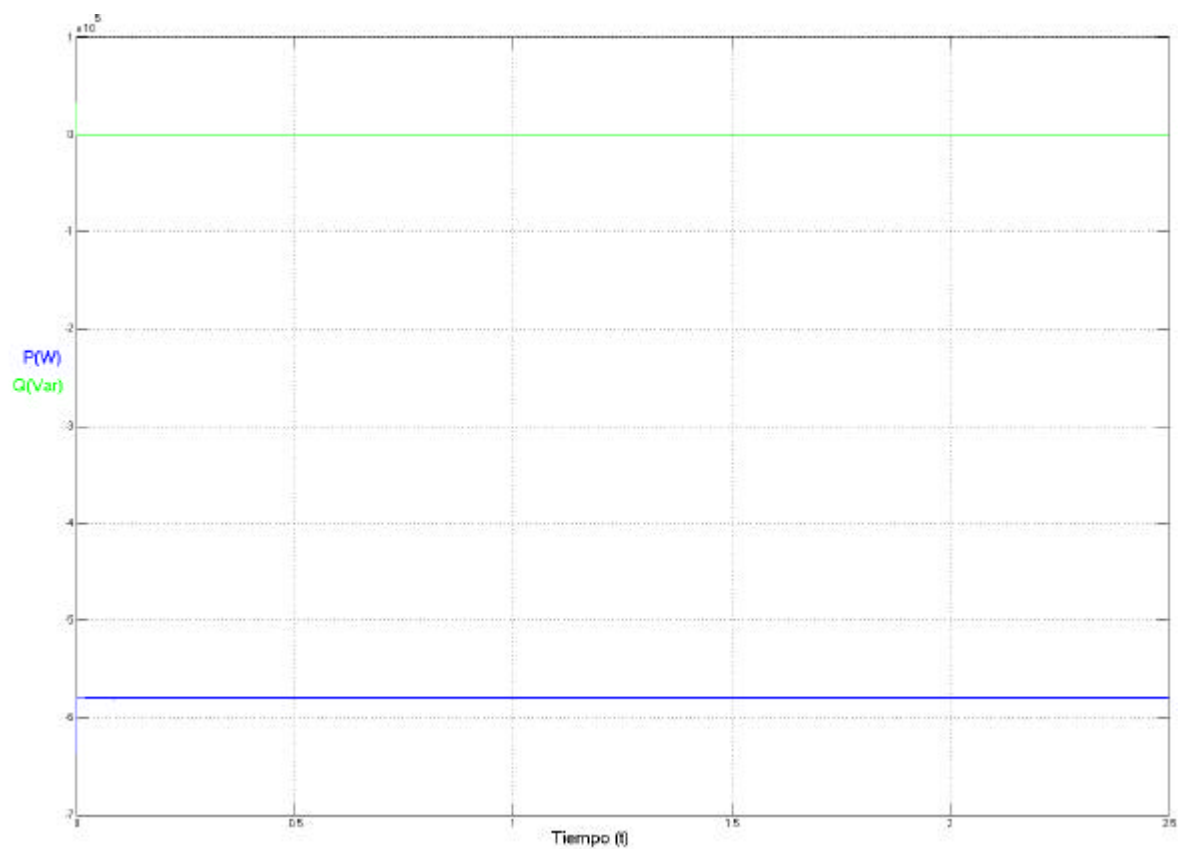


Gráfico 3 – 5 Potencia activa y reactiva.

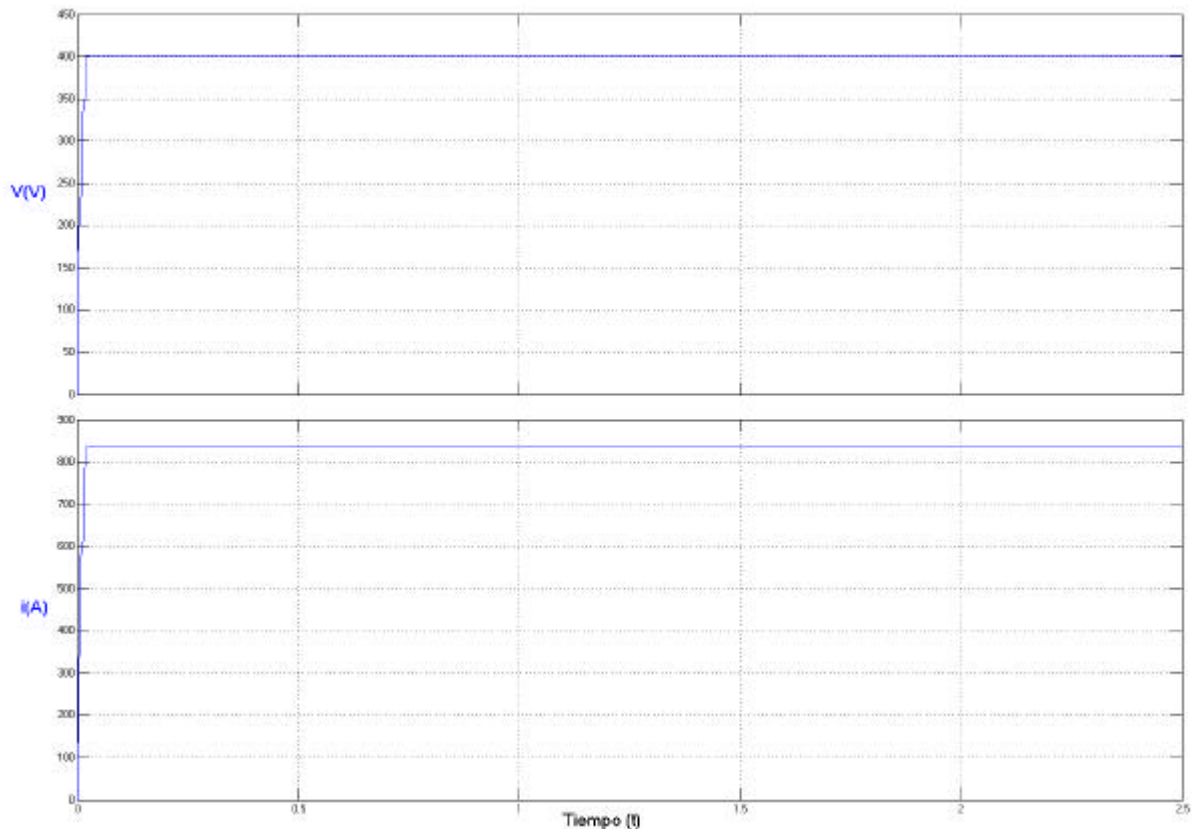


Gráfico 3 – 6 Tensión e intensidad eficaz.

3.2.5 CONCLUSIONES

En este caso la potencia activa (gráfico 3-5) resulta negativa, puesto que la orientación en el bloque de medidas es contraria a la orientación del flujo de potencia. La tensión en bornas de la máquina es superior a la tensión en el secundario del transformador, lo que justifica el flujo de potencia de la máquina síncrona hacia la red. En el gráfico 3-7 se puede ver el esquema empleado en *Simulink*.

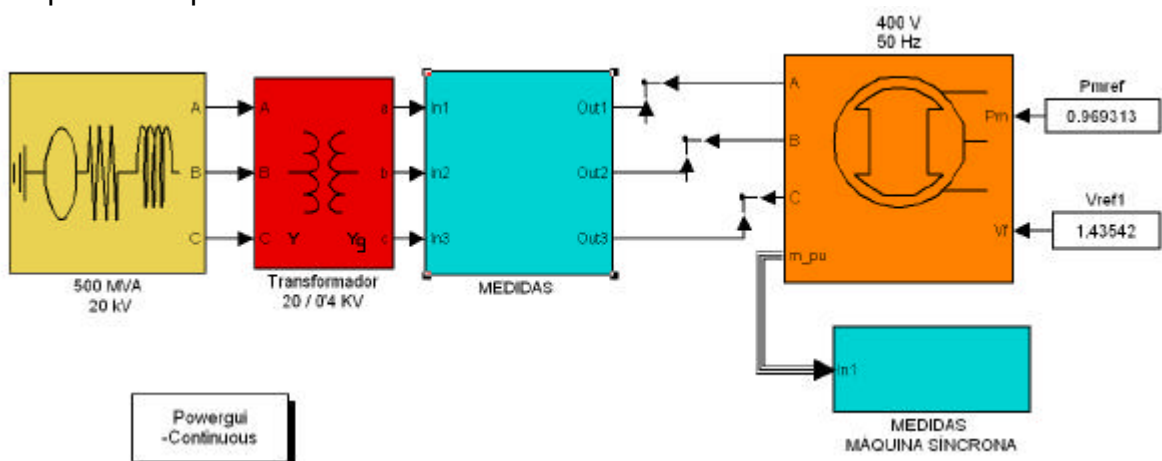


Gráfico 3 – 7 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 3-2

CAPÍTULO 4

COMPORTAMIENTO DE GENERADORES AISLADOS

CAPÍTULO 4: COMPORTAMIENTO DE GENERADORES AISLADOS

4.1 ACTUACIÓN DE RED CON CARGA VARIABLE

4.1.1 OBJETO

Estudio del comportamiento de la red cuando ésta alimenta a una carga que varía con el tiempo. Se analizará la evolución de los flujos de potencias.

4.1.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 4-1, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste unifilar se compone de cuatro bloques: red, transformador, medidas y carga. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

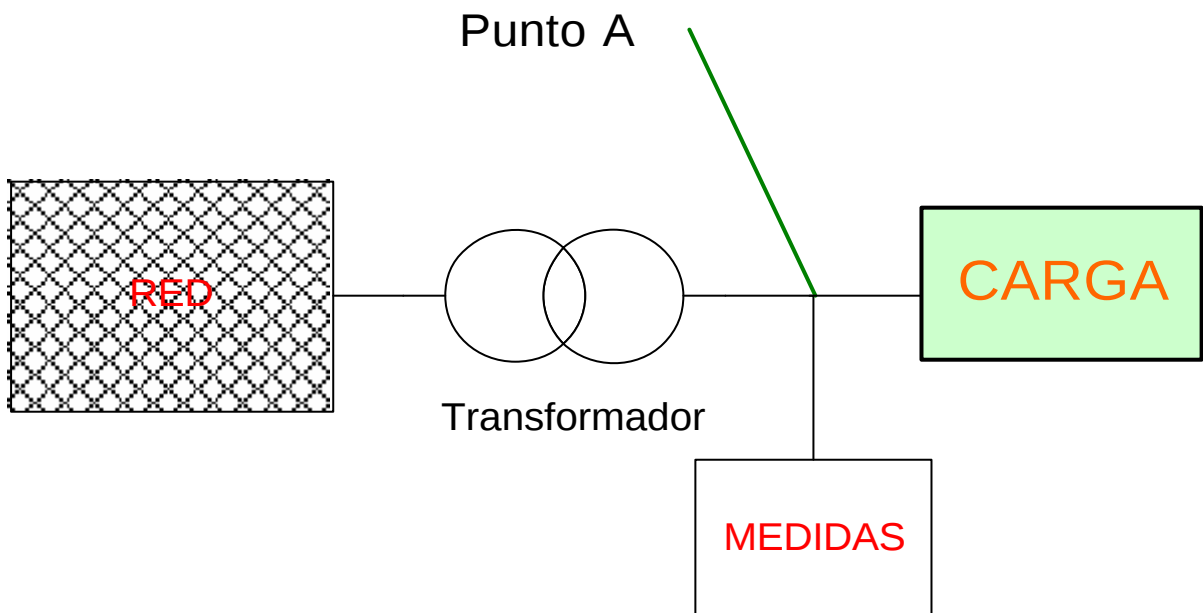


Gráfico 4 - 3 Esquema Unifilar.

4.1.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

A continuación se definirán los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. Para que en la simulación se vea el efecto dinámico de ir añadiendo cargas, se irán conectando cargas de diferentes tamaños y de tipo resistivo, capacitivo o inductivo. En esta simulación se conectarán tres cargas diferentes como se indica en las tablas 4-3 , 4-4 y 4-5.

- BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 4 - 9.

- BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	5
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.4
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 4 - 10.

▪ BLOQUES DE CARGA

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	600
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	0
Tiempo de conexión (seg)	0

Tabla 4 - 11.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	2000
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	0
Tiempo de conexión (seg)	2

Tabla 4 – 4.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	0
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	2000
Tiempo de conexión (seg)	5

Tabla 4 – 5.

4.1.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 8 seg. donde se irán conectando las cargas progresivamente en el punto A como se indica en el gráfico 4-1. Se representarán en el gráfico 4-2 a los flujos de potencia de la red a las cargas. Los resultados una vez pasados los transitorios que tienen lugar después de las conexiones se expresarán en la tabla 4-6.

Periodos de tiempo (seg)	0 – 2	2 - 5	5 - 8
Potencia Activa (kW)	602.6	2591	2589
Potencia Reactiva (kVar)	0	0	1991

Tabla 4 – 6.

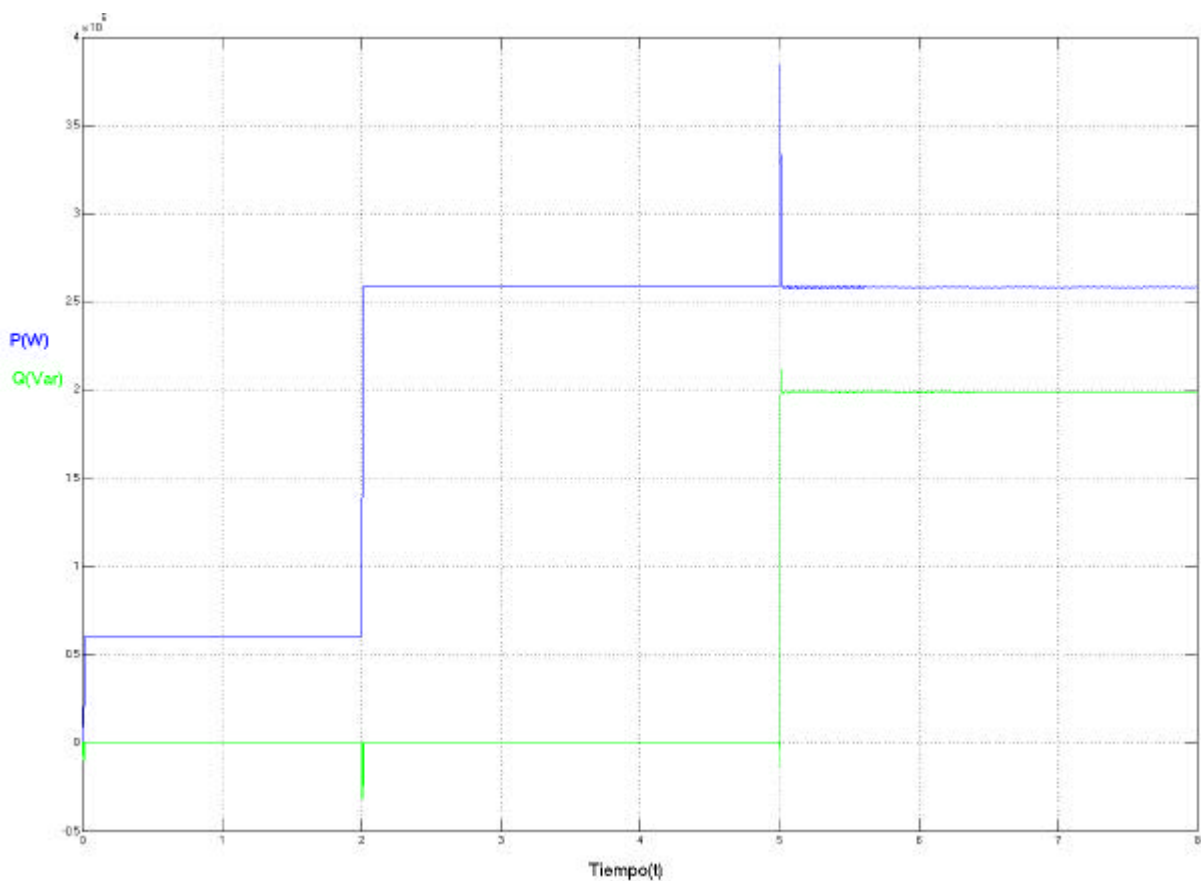


Gráfico 4 - 2 a Potencia activa y reactiva.

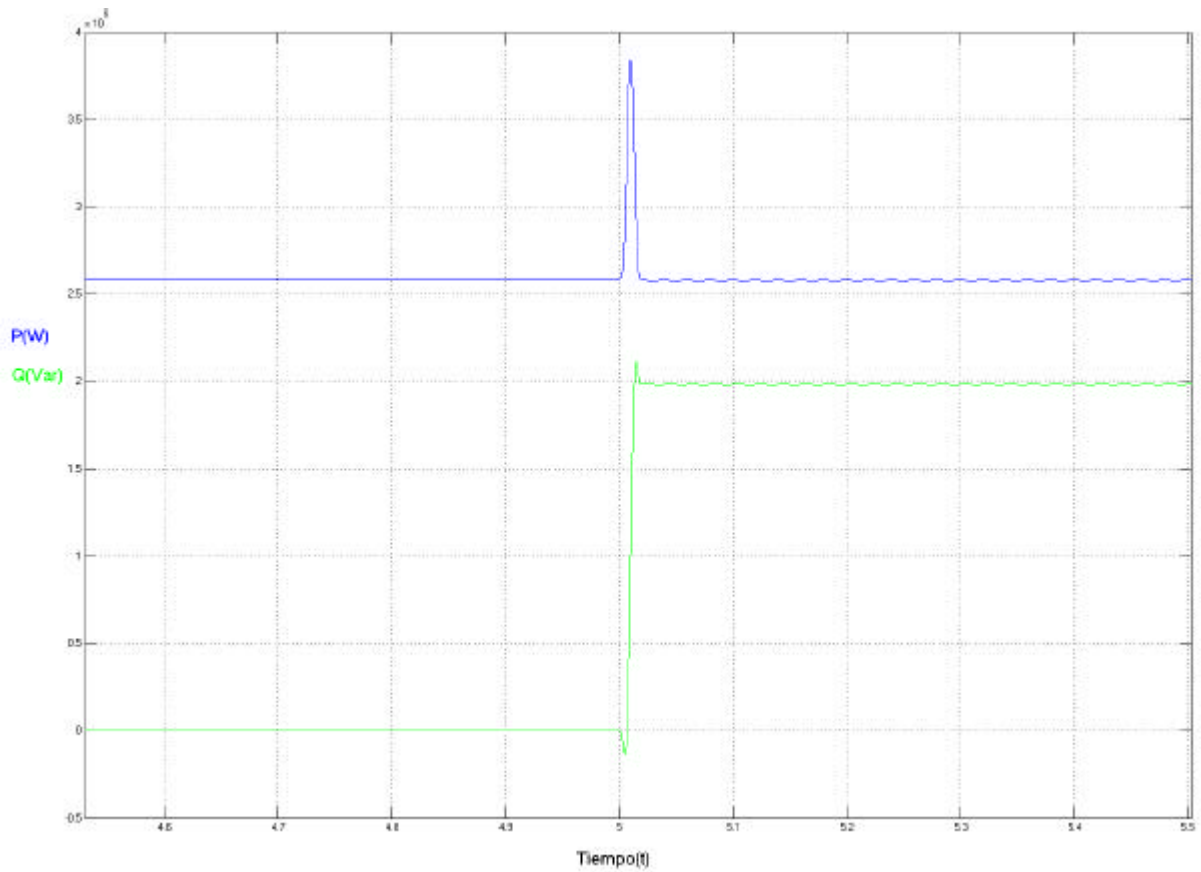


Gráfico 4 - 2 b Zoom potencia activa y reactiva.

4.1.5 CONCLUSIONES

Las conexiones de las cargas se producen sin impedancias en los contactos. Cuando se realiza en el segundo 2 la conexión de la segunda carga resistiva, se produce un escalón, igual que al conectar la tercera carga de tipo inductivo. En el gráfico 4-2 b se ha realizado un zoom alrededor del segundo 5 para ver de forma más clara el transitorio que se produce. En el gráfico 4-3 se puede ver el esquema empleado en *Simulink*.

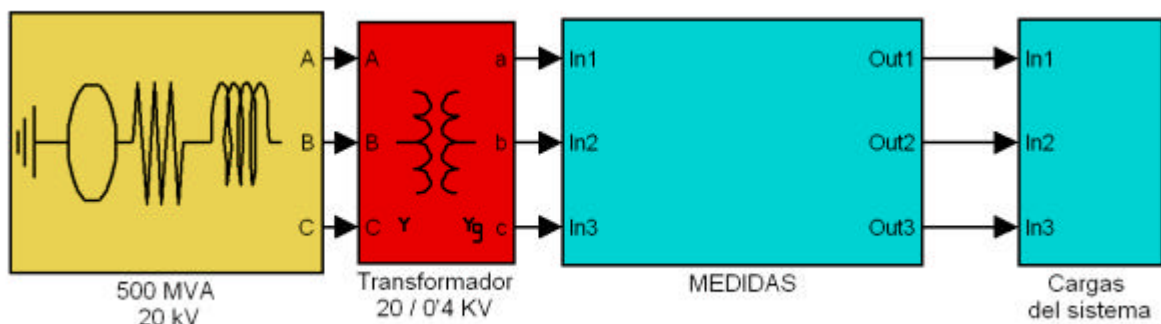


Gráfico 4 – 3 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 4-1.

4.2 ACTUACIÓN DE GENERADOR ASÍNCRONO CON CARGA

4.2.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina asíncrona trabajando como generador aisladamente y alimentando una carga. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y velocidad angular del rotor.

4.3.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 4-4, representando el sistema eléctrico a estudiar. Este unifilar se compone de seis bloques: red, transformador, medidas, carga, interruptor y máquina asíncrona que actúa como generador. En este caso se tomarán medidas de dos puntos diferentes (A y B). En dichos bloques se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

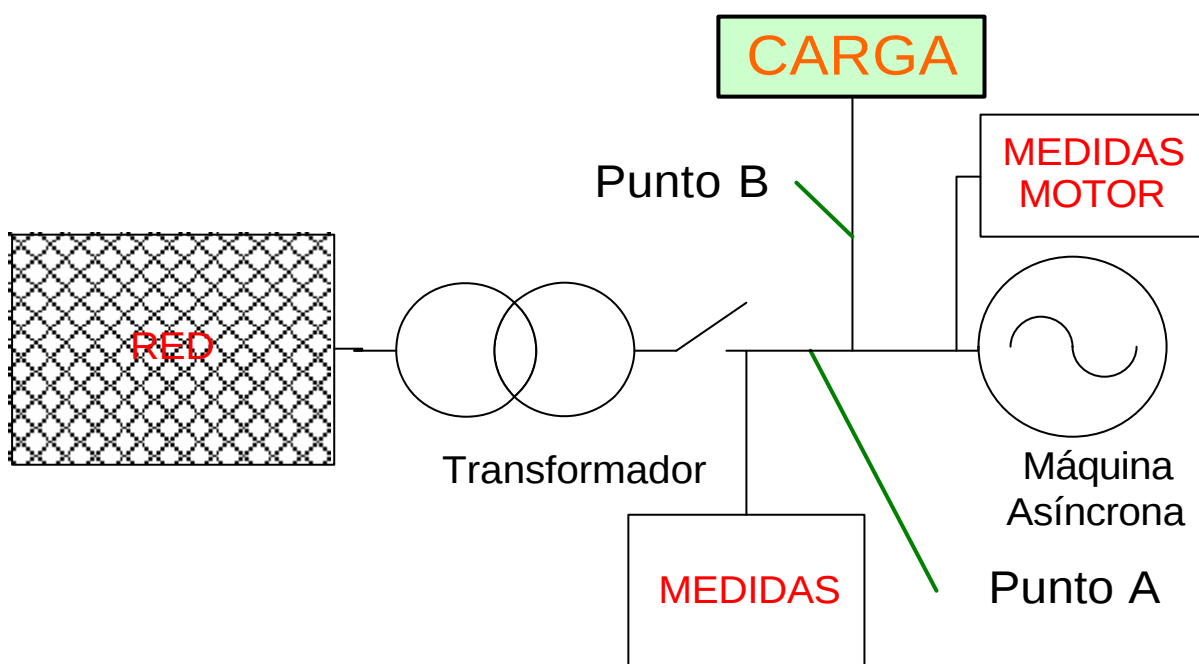


Gráfico 4 - 4 Esquema Unifilar.

4.2.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques se describen en las tablas 4-7, 4-8, 4-9, 4-10 y 4-11.

- BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 4 – 7.

- BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	0.75
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.4
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 4 – 8.

- BLOQUE DEL INTERRUPTOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase BREAKER	valores
Estado inicial de los interruptores	cerrados
Interruptor de la fase A	Seleccionado
Interruptor de la fase B	Seleccionado
Interruptor de la fase C	Seleccionado
Tiempo de transición (seg)	2

Tabla 4 – 9.

- BLOQUE DE CARGA.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	690
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	600
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	0
Tiempo de conexión (seg)	0

Tabla 4 – 10.

- BLOQUE DE LA MÁQUINA ASÍNCRONA.

PARÁMETROS DEL BLOQUE asynchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	690
Potencia nominal (KVA)	666.844
Resistencia del estator (ohm)	0.0073
Reactancia del estator (H)	0.0002387

Inductancia mutua (H)	0.0103
Resistencia del rotor (ohm)	0.0065
Reactancia del rotor (H)	0.0002864
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	2

Tabla 4 – 11.

El procedimiento empleado para realizar esta simulación sigue los siguientes pasos:

1º Se arranca el sistema con los interruptores cerrados. De esta forma podemos alimentar a la máquina y generar el campo magnético que necesita para funcionar.

2º En el segundo 2, se abren los interruptores quedando la máquina asíncrona alimentando a la carga.

4.2.4 RESULTADOS

La simulación se ejecuta durante 5 seg. y en ella se puede observar la evolución de la potencia activa y reactiva en el punto A (gráfico 4-5) y la potencia absorbida por la carga (gráfico 4-6). También se ve la evolución de la tensión y de la intensidad en los puntos B y A (gráficos 4-7 y 4-8). En los gráficos 4-9 y 4-10 se presenta la evolución del Par y de la velocidad angular respectivamente.

Los resultados de la simulación antes de que se produzca la apertura de los seccionadores son los que se indican en la tabla 4-12.

variables	valores
Tensión de línea en A (V)	689.9
Intensidad de línea en A (A)	231.2
Potencia activa en A (kW)	14.770
Potencia reactiva en A (kVar)	276.3
Tensión de línea en B (V)	689.9
Intensidad de línea en B (A)	502
Potencia activa en B (kW)	600
Potencia reactiva en B (kVar)	0

Tabla 4 – 12.

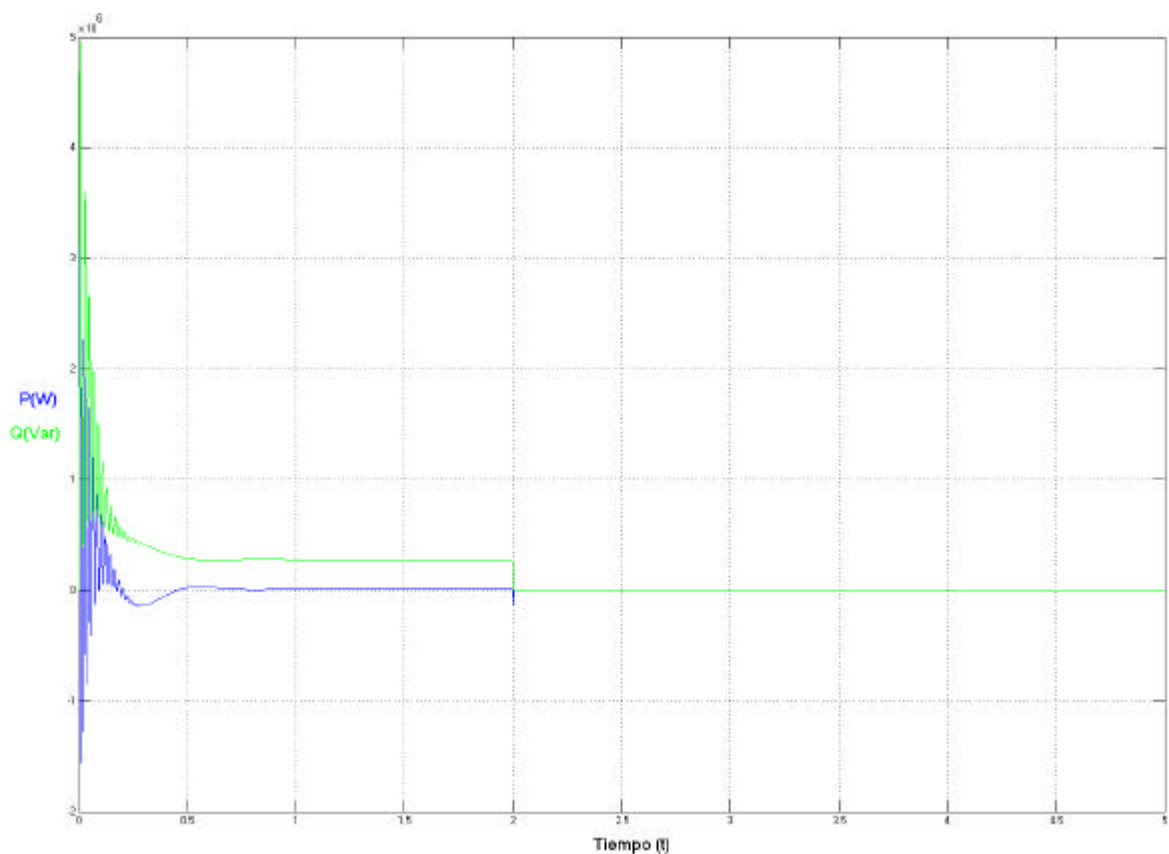


Gráfico 4 – 5 Potencia activa y reactiva de la red al punto A.

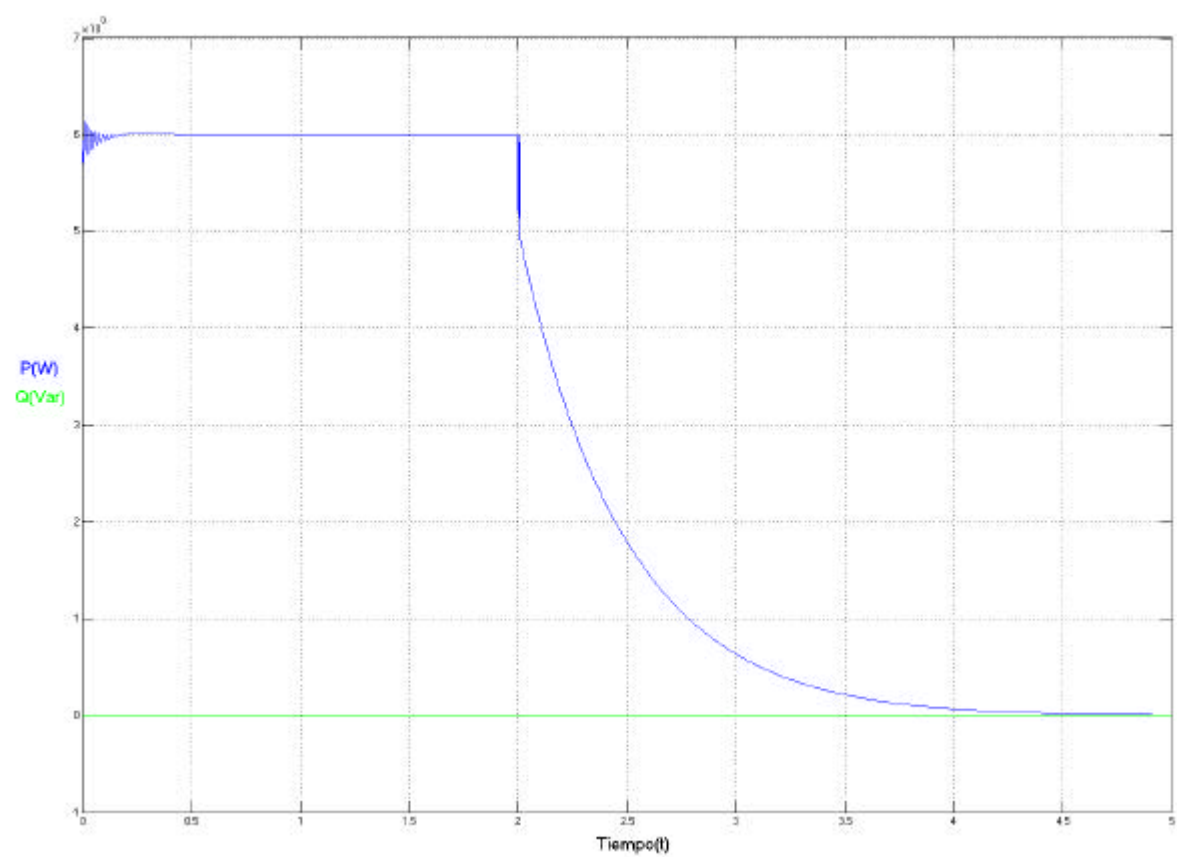


Gráfico 4 – 6 Potencia activa y reactiva absorbida por la carga (punto B).

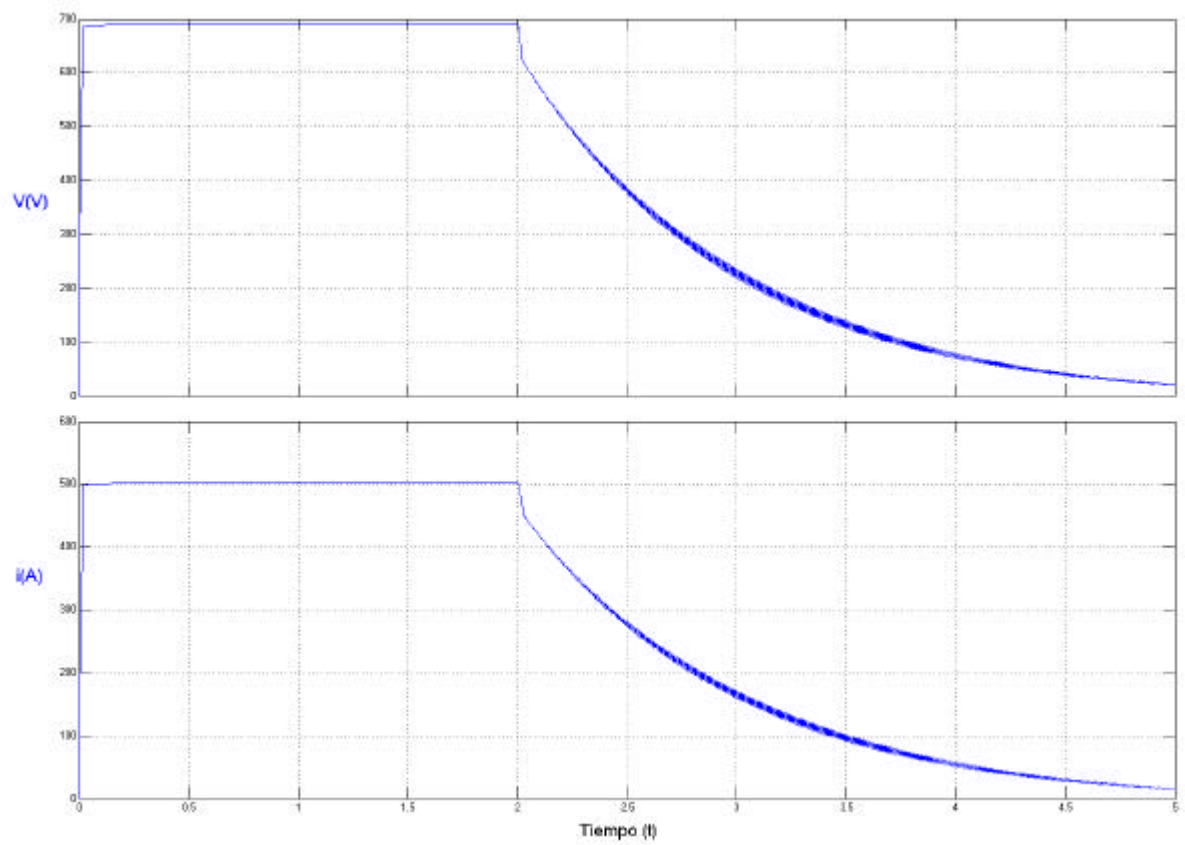


Gráfico 4 – 7 Tensión e intensidad eficaz absorbida por la carga (punto B).

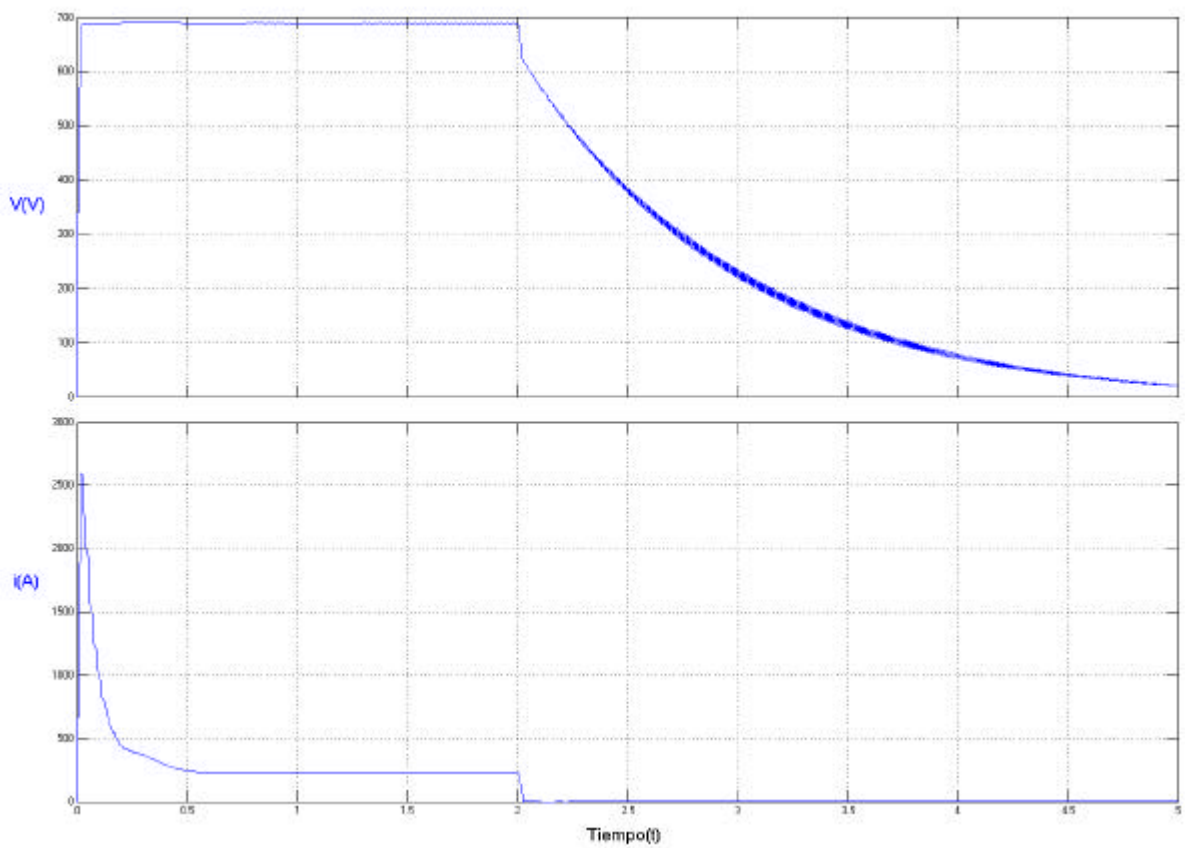


Gráfico 4 – 8 Tensión e intensidad eficaz en el punto A.

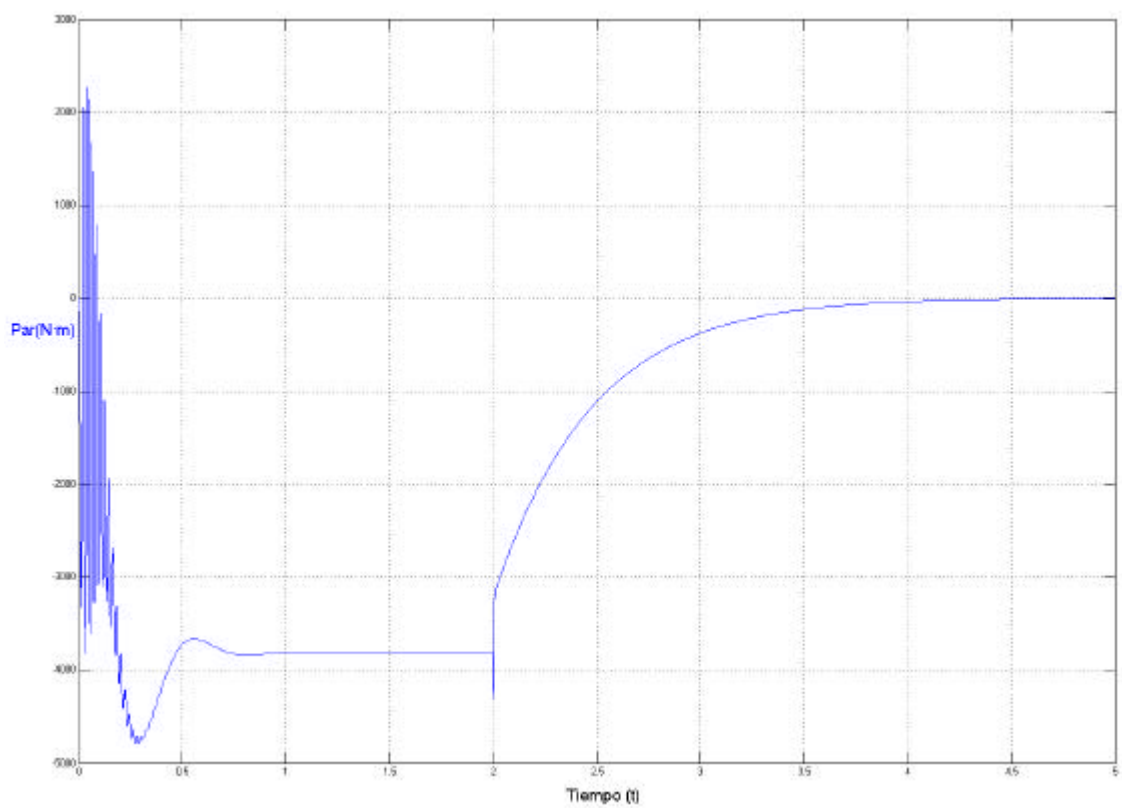


Gráfico 4 – 9 Par de la máquina asíncrona.

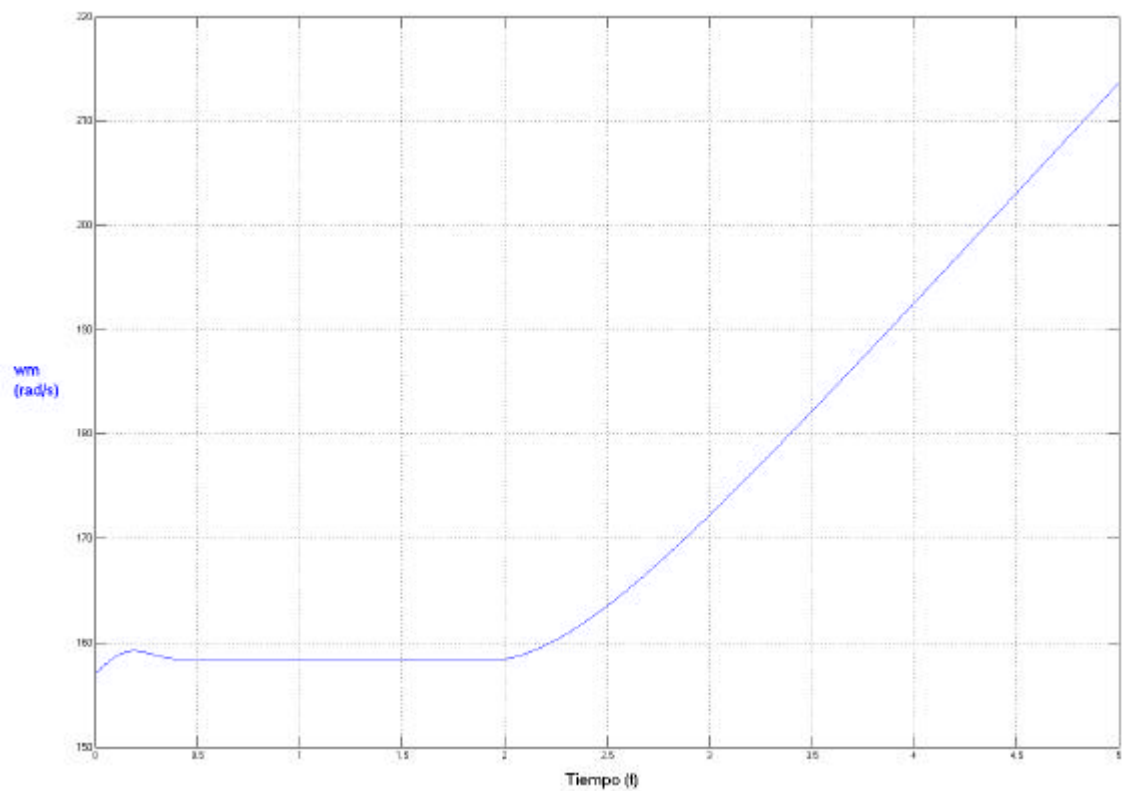


Gráfico 4 – 10 Velocidad del rotor de la máquina asíncrona.

4.2.5 CONCLUSIONES

Inicialmente, la red suministra a la máquina asíncrona la potencia reactiva que necesita para crear el campo magnético. La carga, que es de tipo resistivo es alimentada por la máquina eléctrica que actúa como generador. En el segundo 2 se abren los interruptores, quedando la máquina asíncrona y la carga, aislada de la red. Como consecuencia de esto la red deja de suministrar potencia reactiva por lo que la máquina no puede crear un campo magnético que induzca en el estator una terna de intensidades trifásicas senoidales, lo que provoca que la potencia activa disminuya y por consiguiente el par entregado por la máquina asíncrona. En los gráficos 4-6 y 4-9 se presentan la evolución de la potencia activa y del par respectivamente.

Respecto a la velocidad del rotor se observa en el gráfico 4-10 que se produce un incremento de la velocidad debido a que el par resistivo disminuye y por consiguiente la velocidad del rotor aumenta para que se cumpla la ecuación 4-1.

$$T_{gen} - T_{res} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4-1)$$

Podemos concluir que la máquina asíncrona al no tener capacidad de generar campo magnético necesita estar conectada a la red, para que ésta se lo suministre.

En el gráfico 4-11 se puede ver el esquema empleado en *Simulink*.

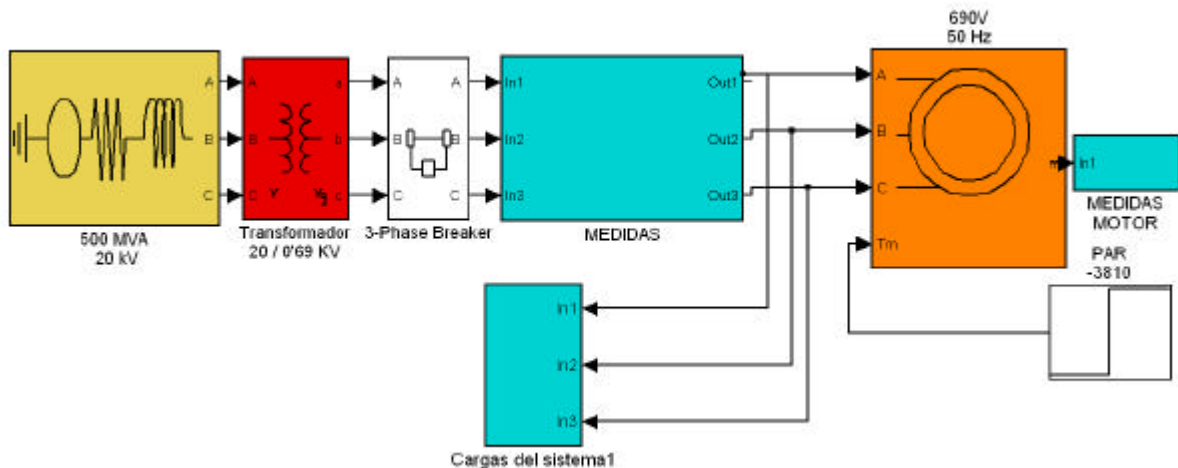


Gráfico 4 – 11 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 4-2.

4.3 ACTUACIÓN DE GENERADOR SÍNCRONO CON CARGA VARIABLE Y BLOQUE DE CONTROL

4.3.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina síncrona trabajando como generador aisladamente y alimentando una carga variable. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva.

4.3.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 4-12, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste unifilar se compone de tres bloques: máquina síncrona, medidas y carga. Las medidas se realizarán en el punto A.

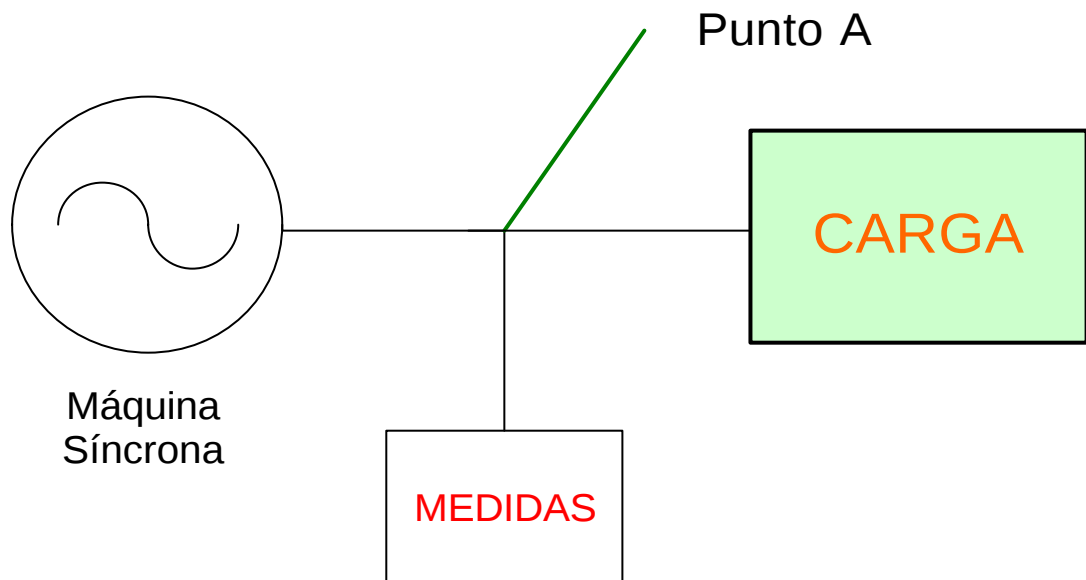


Gráfico 4 - 12 Esquema Unifilar.

4.3.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Los valores de los parámetros de cada uno de los bloques se describen en las tablas 4-13, 4-14, 4-15. Para que en la simulación se vea el efecto dinámico de ir añadiendo cargas, se irán conectando cargas de diferentes tamaños y de tipo resistivo, capacitivo o inductivo.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR SÍNCRONO

PARÁMETROS DEL BLOQUE synchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Polos salientes
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	400
Potencia nominal (KVA)	6000
Resistencia del estator (pu)	0.00285
Reactancia del estator (pu)	0.114
Reactancia mutua del estator eje d (pu)	1.19
Reactancia mutua del estator eje q (pu)	0.36
Resistencia de campo (pu)	0.000579
Reactancia de campo (pu)	0.114
Resistencia amortiguadora eje d (pu)	0.0117
Reactancia amortiguadora eje d (pu)	0.182
Resistencia amortiguadora eje q (pu)	0.0197
Reactancia amortiguadora eje q (pu)	0.384
Inercia (Kg · m ²)	6.7
Pares de polos	20

Tabla 4 - 13.

▪ BLOQUES DE CARGA

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	600
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	0
Tiempo de conexión (seg)	0

Tabla 4 – 14.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	2000
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	0
Tiempo de conexión (seg)	10

Tabla 4 – 15.

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-PHASE SERIES RLC LOAD	valores
Tensión fase-fase (V)	400
Frecuencia (Hz)	50
Potencia activa trifásica (kW)	0
Potencia reactiva inductiva trifásica (kVar)	0
Potencia reactiva capacitiva trifásica (kVar)	2000
Tiempo de conexión (seg)	100

Tabla 4 – 16.

4.3.4 RESULTADOS

La simulación se ejecuta durante 200 seg. y en ella se observa la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 4-13) y la evolución de la tensión y de la intensidad en los gráficos 4-14 y 4-15 respectivamente.

Los resultados de la simulación durante los diferentes períodos de tiempo en los que se van conectando las cargas una vez pasado el transitorio se indica en la tabla 4-17.

Periodos de tiempo (seg)	0 – 10	10 - 100	100 - 200
Tensión (V)	400.8	401.1	386.5
Intensidad (A)	875.6	3771	4573
Potencia Activa (kW)	600	2620	2441
Potencia Reactiva (kVar)	0	0	1891

Tabla 4 – 17.

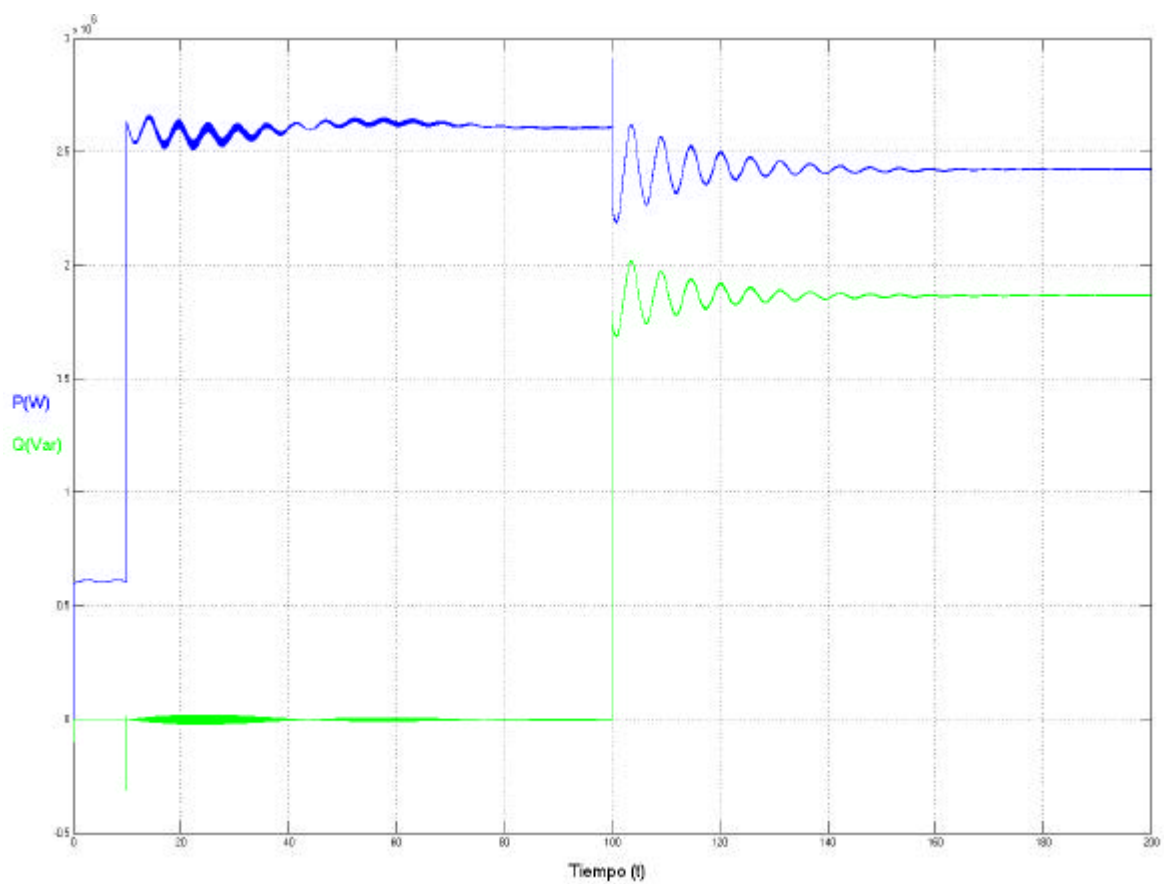


Gráfico 4 - 13 Potencia activa y reactiva.

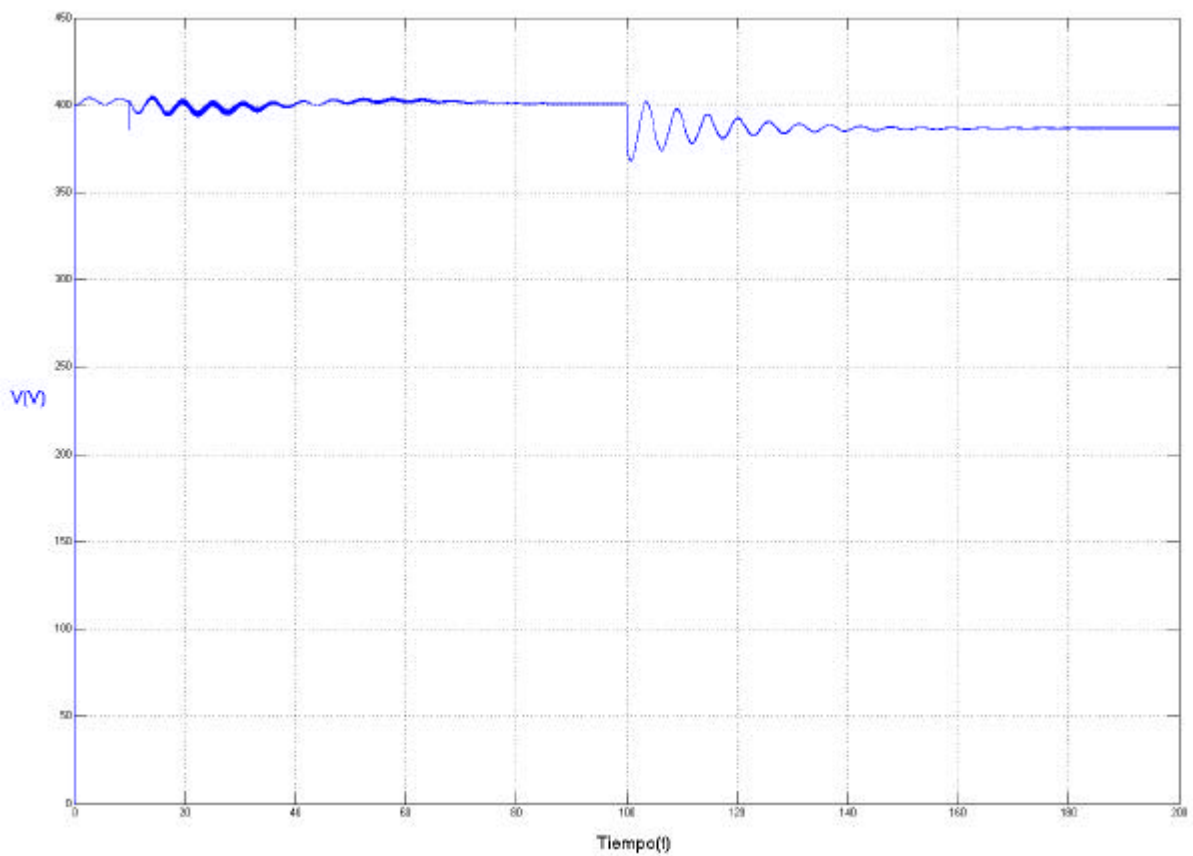


Gráfico 4 – 14 Tensión eficaz.

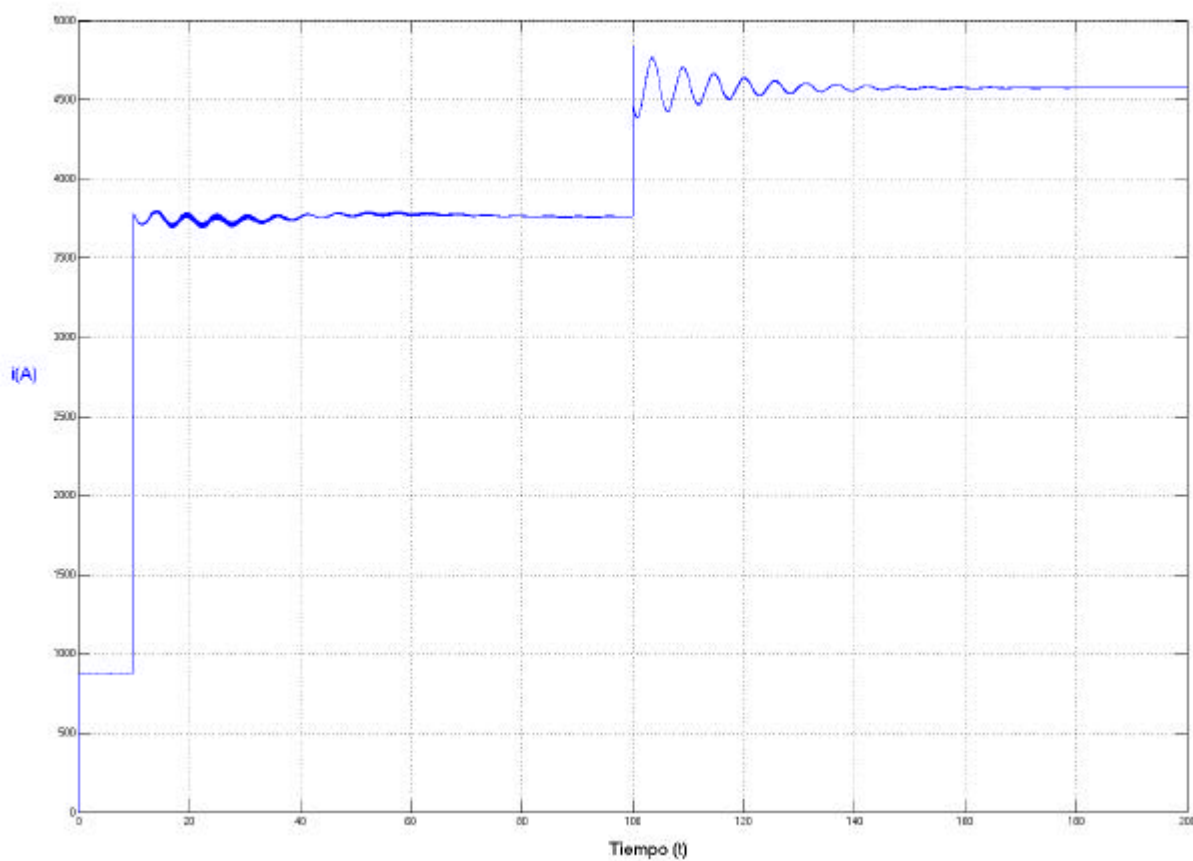


Gráfico 4 – 15 Intensidad eficaz.

4.3.5 CONCLUSIONES

Se observa que la máquina síncrona si puede trabajar de forma aislada alimentando a una carga, no siendo así para el caso de la máquina asíncrona ya que carece de excitación propia. El bucle de control incorporado tanto para la tensión de excitación como para la potencia mecánica hace que la máquina se vaya adaptando al valor de la carga que tiene que alimentar en cada momento. Debido a ello, en el momento que se conectan las cargas se producen oscilaciones en los parámetros V, I, Q y P como se observa en los gráficos 4-13, 4-14 y 4-15. En el gráfico 4-16 se puede ver el esquema empleado en *Simulink*.

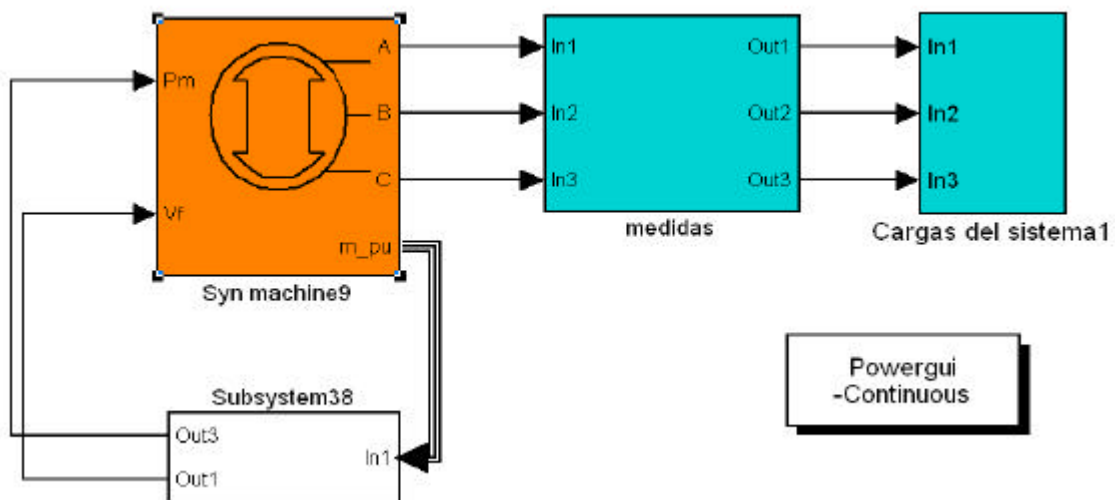


Gráfico 4 – 16 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 4-3.

CAPÍTULO 5

COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN ESTÁTICO PARA PARQUES EÓLICOS

CAPÍTULO 5: COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN ESTÁTICO PARA PARQUES EÓLICOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Las tres variables principales que afectan en la conexión de un parque eólico a la red son:

- Potencia eólica instalada.
- Potencia de cortocircuito de la red.
- Tipo de generador instalado.

La potencia eólica instalada se refiere a la suma de las potencias que entrega cada uno de los molinos del parque a la red cuando éste funciona a máximo rendimiento.

La potencia de cortocircuito es el máximo valor de potencia que la red puede proveer a una instalación durante una falta. La potencia de cortocircuito depende directamente de la configuración de la red y de sus componentes: líneas, cables, transformadores, motores y todo componente que sea atravesado por la corriente de cortocircuito. Las fuentes de cortocircuito, o sea, las que suministran intensidad al cortocircuito son los generadores y máquinas rotantes.

La generación eólica no suele provocar problemas de cortocircuito. Esto es debido a que las máquinas son de tipo asíncrono en la mayoría de las ocasiones y a que la generación se produce en baja tensión, y por tanto exige una red de distribución intermedia de MT y una estación transformadora con el consiguiente aumento de la impedancia equivalente vista por la red.

Respecto a los diferentes tipos de generadores instalados citamos cuatro de ellos que se pueden encontrar en el mercado.

1. MOTOR ASÍNCRONO Y VELOCIDAD FIJA.

Es el sistema eólico más convencional, consistiendo su montaje en un motor asíncrono conectado directamente a la red. El motor se conecta a la turbina mediante un multiplicador de velocidad. Su esquema se representa en el gráfico 5-1.

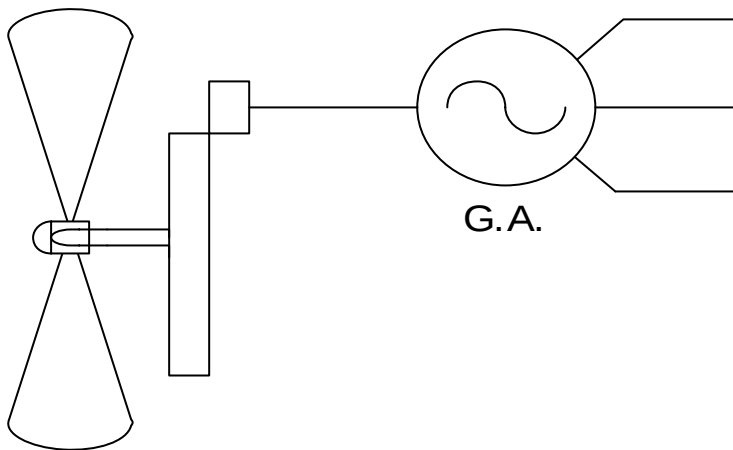


Gráfico 5-1 Esquema sistema eólico. Generador asíncrono y velocidad fija.

2. GENERADOR SÍNCRONO DE VELOCIDAD VARIABLE.

Este sistema eólico consiste en un generador síncrono con un multiplicador de velocidad que lo separa de la turbina eólica. Entre el generador y la red se coloca un convertidor que consiste en un rectificador que convierte unas ondas de alternas de tensión obtenidas del generador, una etapa de continua y un inversor que ondula la tensión continua transformándola en un sistema trifásico de tensiones de la misma frecuencia de la red. Por medio de este sistema el generador eólico queda desacoplado eléctricamente de la misma. Su esquema se representa en el gráfico 5-2.

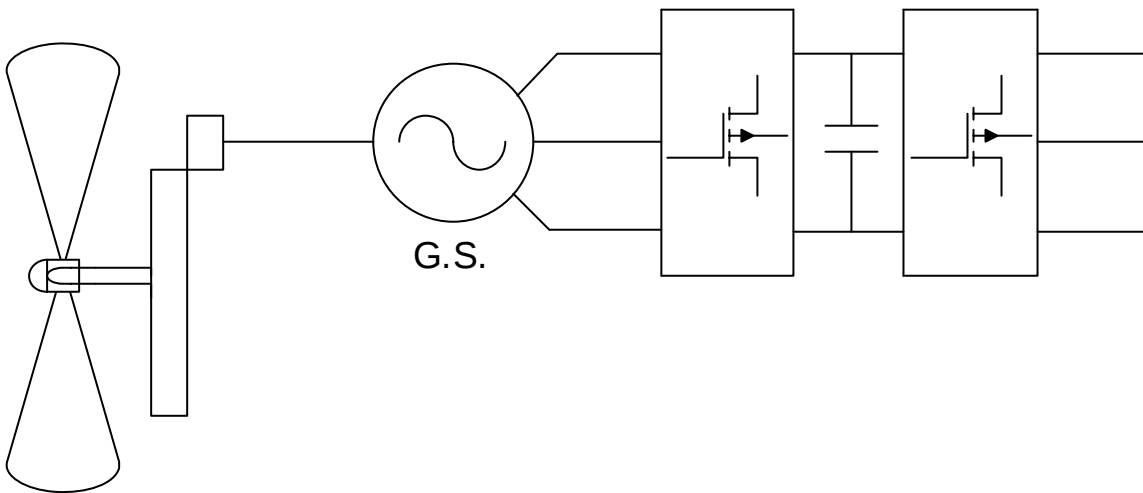


Gráfico 5-2 Esquema generador síncrono y velocidad variable.

Dentro de las nuevas tecnologías podemos distinguir:

3. GENERADOR ASÍNCRONO DOBLEMENTE ALIMENTADO.

En este sistema eólico se coloca el convertidor en el rotor, haciendo que el tamaño de éste se reduzca y pudiéndose variar la frecuencia de las corrientes rotóricas, mientras que el estator está directamente conectado a la red. Un transformador adapta la tensión de la red a la tensión en el rotor del generador. En este sistema el generador sigue unido a la turbina a través de un multiplicador de velocidad. Su esquema se representa en el gráfico 5-3.

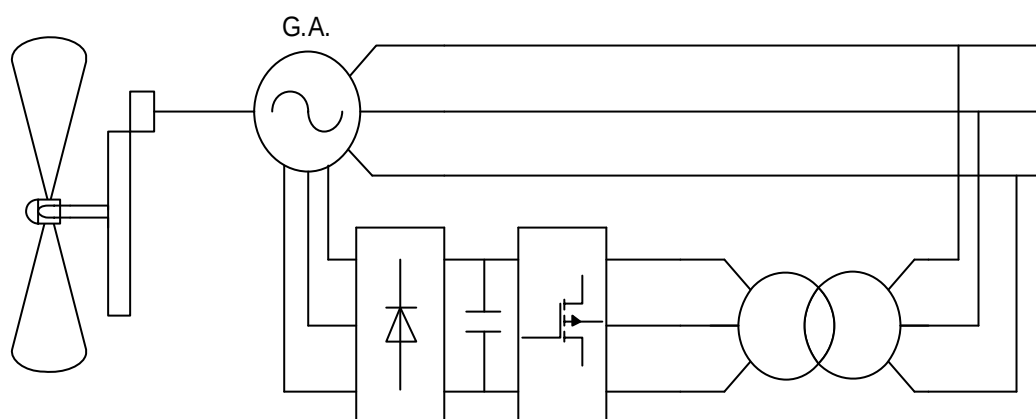


Gráfico 5-3 Esquema generador asíncrono doblemente alimentado.

4. GENERADOR SÍNCRONO DE VELOCIDAD VARIABLE CONECTADO DIRECTAMENTE A LA TURBINA.

Son máquinas con un diámetro considerable pero con un comportamiento frente a la red muy bueno y con la ventaja de la ausencia de multiplicador de velocidad. Su esquema se representa en el gráfico 5-4.

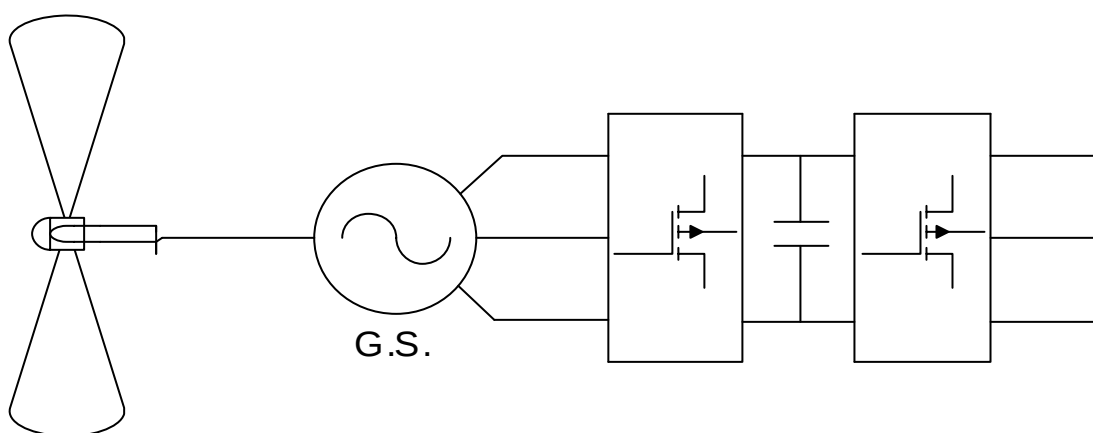


Gráfico 5-4 Esquema generador síncrono de velocidad variable conectado directamente a la turbina.

5.2 RÉGIMEN ESTÁTICO

En régimen estático los problemas que se dan son de sobrecarga en las líneas y de control de tensión en la red.

El principal es el de inestabilidad de tensiones, y en su caso extremo el colapso de tensión.

Como los generadores son de inducción con compensación de reactiva, cuando existe un hueco de tensión en la red se producen dos efectos adversos; El primero es que en los generadores al bajar la tensión disminuye el campo magnético en el interior de la máquina asíncrona, y por tanto el consumo de reactiva aumenta de forma cuadrática con la caída de tensión; y el segundo es que la aportación de energía reactiva de las baterías de condensadores disminuye cuadráticamente con la tensión.

Otro efecto a tener en cuenta es que el aumento de flujo de energía activa del parque hacia la red conlleva un aumento de energía reactiva absorbida por el parque eólico. Este aumento de energía hace que se sobrecarguen las líneas y que las tensiones disminuyan, provocando que se absorba más energía reactiva de la red para aumentar las tensiones. Este círculo vicioso es el que provoca el colapso de tensiones.

5.3 OBJETO

Calcular las curvas Q-V y P-V para analizar los efectos descritos en el apartado 5.2

5.4 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 5-5. Éste unifilar se compone de los siguientes bloques: red, línea, transformador, medidas y 10 máquinas asíncronas. El bloque de medidas se conectará en el punto A y en el punto B. En el punto A se tomarán las medidas de tensión y en el punto B los flujos de potencia activa y reactiva. Los valores de los diferentes bloques que se van a emplear en la simulación se expresan en las tablas 5-1, 5-2, 5-3, 5-4.

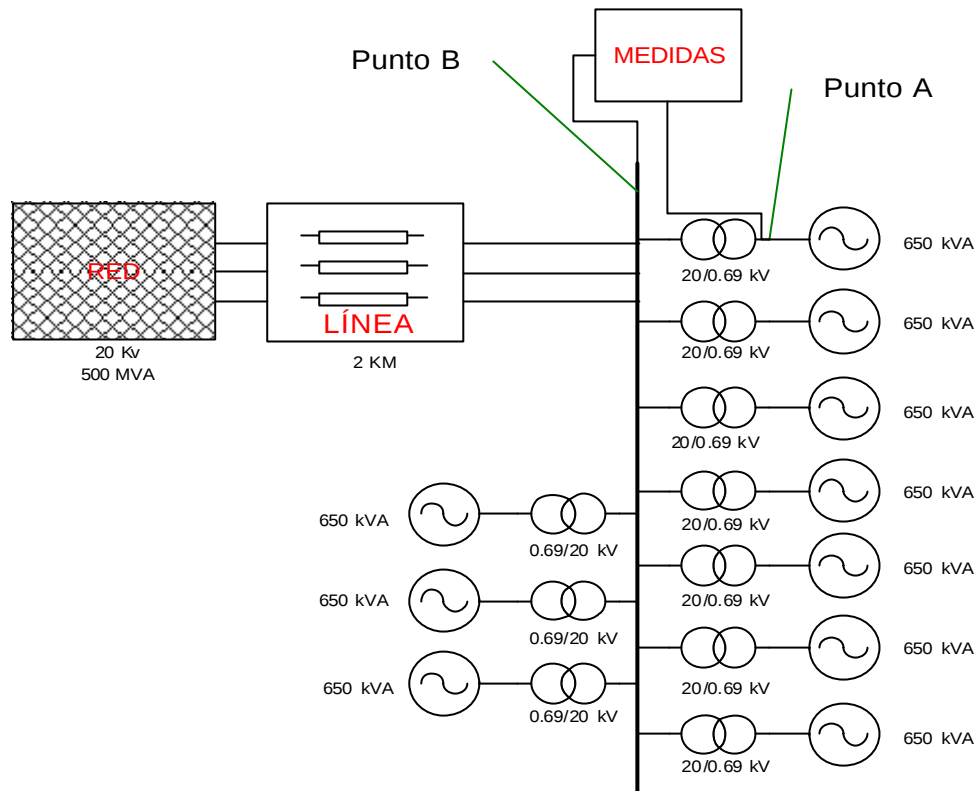


Gráfico 5-5 Esquema del parque eólico ensayado.

▪ BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	500
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 5 - 1.

▪ BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	0.75
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.69
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 5 - 12.

▪ BLOQUE DE LA LÍNEA

PARÁMETROS DEL BLOQUE DISTRIBUTED PARAMETERS LINE	valores
Número de fases	3
Frecuencia (Hz)	50
Resistencia secuencia homopolar (ohm/km)	0.03726
Resistencia secuencia directa (ohm/km)	0.34223
Inductancia secuencia homopolar (H/km)	0.00116
Inductancia secuencia directa (H/km)	0.00394
Capacitancia secuencia homopolar (F/km)	$37.13 \cdot 10^{-9}$
Capacitancia secuencia homopolar (F/km)	$55.97 \cdot 10^{-9}$
Longitud de la línea (km)	2

Tabla 5 – 3.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE asynchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	690
Potencia nominal (KVA)	650
Resistencia del estator (ohm)	0.0073
Reactancia del estator (H)	0.0002387
Inductancia mutua (H)	0.0103
Resistencia del rotor (ohm)	0.0065
Reactancia del rotor (H)	0.0002864
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	2

Tabla 5 – 4.

5.5 RESULTADOS

Para obtener las curvas Q-V se irá modificando el valor de la tensión de la red, es decir, en cada una de las simulaciones en el bloque de red se aumentará o disminuirá la tensión. La potencia reactiva y la potencia activa se miden en el punto B.

Para el caso en el que el parque cede 5.8 MW se obtienen los siguientes resultados:

TENSIÓN EN EL BLOQUE DE RED (V)	TENSIÓN MEDIDA EN EL PUNTO A (V)	TENSIÓN EN P.U.	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	potencia activa (MW)
24000	814.3	1.18	2.936	5.834
23000	779.6	1.12	2.856	5.831
22000	744.7	1.07	2.795	5.824

21000	709.6	1.02	2.759	5.816
20000	674.2	0.97	2.753	5.857
19000	638.3	0.92	2.782	5.796
18000	601.7	0.87	2.867	5.781
17000	564	0.81	3.029	5.726
16000	524	0.75	3.326	5.733

Tabla 5 – 5.

Para el caso en el que el parque cede 4.6 MW se obtienen los siguientes resultados:

TENSIÓN EN EL BLOQUE DE RED (V)	TENSIÓN MEDIDA EN EL PUNTO A (V)	TENSIÓN EN P.U.	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	potencia activa (MW)
24000	815.6	1.18	2.603	4.667
23000	781.2	1.13	2.490	4.665
22000	746.8	1.08	2.392	4.660
21000	712.2	1.03	2.310	4.656
20000	677.4	0.98	2.248	4.651
19000	642.4	0.93	2.208	4.638
18000	607	0.87	2.196	4.637
17000	571.2	0.82	2.221	4.627
16000	534.6	0.77	2.298	4.614

Tabla 5 – 6.

En el caso de que le parque ceda 3.1MW se obtienen los siguientes resultados:

TENSIÓN EN EL BLOQUE DE RED (V)	TENSIÓN MEDIDA EN EL PUNTO A (V)	TENSIÓN EN P.U.	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	potencia activa (MW)
24000	816.4	1.18	2.280	3.120
23000	782.3	1.13	2.138	3.117
22000	748.2	1.07	2.006	3.116
21000	714	1.03	1.885	3.115
20000	679.9	0.98	1.776	3.110
19000	645.4	0.93	1.680	3.110
18000	611	0.88	1.597	3.107
17000	576.4	0.83	1.532	3.103
16000	541.6	0.78	1.486	3.099

Tabla 5 – 7.

Si el parque cede 1.56 MW se obtienen los siguientes resultados:

TENSIÓN EN EL BLOQUE DE RED (V)	TENSIÓN MEDIDA EN EL PUNTO A (V)	TENSIÓN EN P.U.	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	potencia activa (MW)
24000	816	1.18	2.083	1.560
23000	782.3	1.13	1.924	1.560
22000	748.3	1.08	1.774	1.560
21000	714.4	1.03	1.631	1.561
20000	680.4	0.98	1.496	1.560

19000	646.4	0.93	1.370	1.560
18000	612.3	0.88	1.252	1.560
17000	578.3	0.83	1.143	1.559
16000	544.2	0.78	1.044	1.558

Tabla 5 – 8.

Las gráficas Q-V quedan de la siguiente manera:

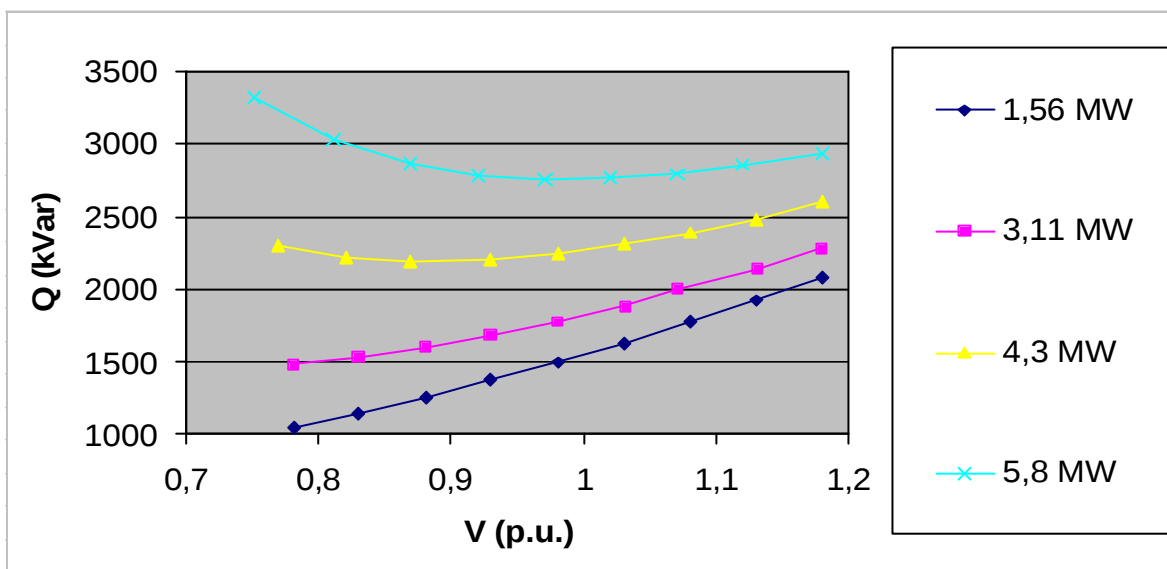


Gráfico 5-6 Curvas Q-V

Las curvas P-V se obtienen con el mismo modelo descrito anteriormente para las curvas Q-V.

En todas las simulaciones se mantiene el valor de la potencia de cortocircuito de la red y se irá variando el par mecánico que suministra la turbina eólica a la máquina asíncrona.

Para una Pcc de 500 MVA los resultados son:

PAR MECÁNICO (N·M)	potencia activa (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	TENSIÓN MEDIDA EN PUNTO A (v)	TENSIÓN EN P.U.
3758	5.812	2.759	686.8	0.99
4000	6.181	2.885	686.5	0.99
5000	7.702	3.834	685.1	0.99
6000	9.192	5.087	682.7	0.98
7000	10.650	6.657	679.1	0.98
8000	12.040	9.435	672.1	0.97

Tabla 5 – 9.

Para una Pcc de 250 MVA los resultados son:

PAR MECÁNICO (N·M)	potencia activa (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	TENSIÓN MEDIDA EN PUNTO A (v)	TENSIÓN EN P.U.
3758	5.841	2.782	683.7	0.99
4000	6.177	2.925	683.7	0.99
5000	7.725	3.724	680.1	0.98
6000	9.202	5.053	675.9	0.97
7000	10.690	7.097	668.6	0.96
8000	12.060	11.090	651.9	0.94

Tabla 5 – 10.

Para una Pcc de 125 MVA los resultados son:

PAR MECÁNICO (N·M)	potencia activa (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	TENSIÓN MEDIDA EN PUNTO A (v)	TENSIÓN EN P.U.
3758	5854	2.705	679.1	0.98
4000	6.192	2.987	677.6	0.98
5000	7.701	3.738	669.4	0.97
6000	9.172	5.200	611	0.95
7000	10.670	6.800	644.5	0.93

Tabla 5 – 10.

Para una Pcc de 100 MVA los resultados son:

PAR MECÁNICO (N·M)	potencia activa (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	TENSIÓN MEDIDA EN PUNTO A (v)	TENSIÓN EN P.U.
3758	5.851	2.796	674.3	0.97
4000	6.180	2.980	673.5	0.97
5000	7.700	3.900	669.1	0.96
6000	9.150	5.223	653.7	0.94

Tabla 5 – 11.

La representación de la gráfica queda de la siguiente manera:

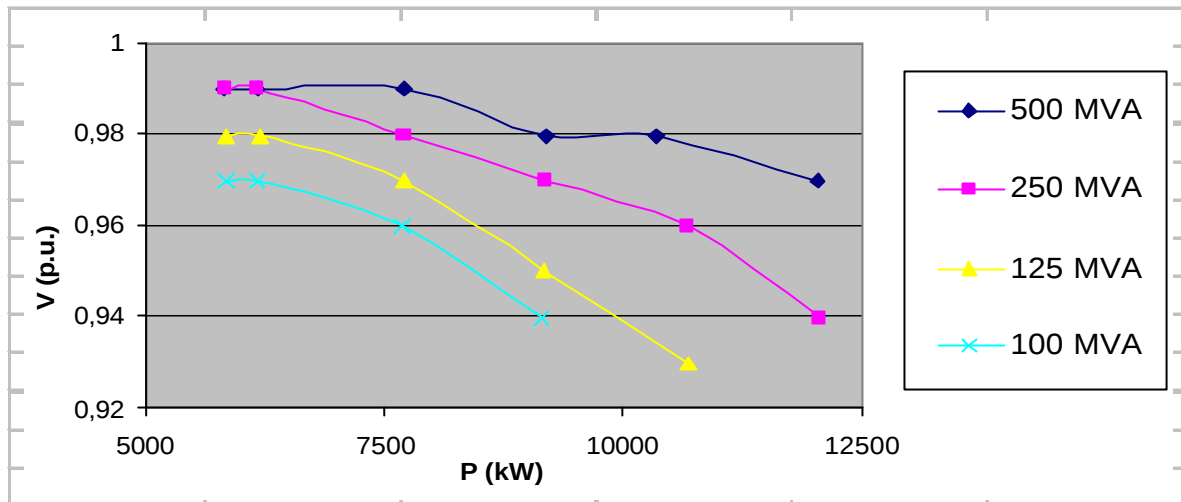


Gráfico 5-6 Curvas P-V

5.6 CONCLUSIONES

- CURVAS Q-V

En las curvas Q-V (gráfico 5-5) se puede observar la cantidad de energía reactiva que necesita el parque para trabajar con un factor de potencia cercano a la unidad para una determinada generación. En el modelo no se ha incluido el uso de baterías de condensadores para que éste no afecte a las tensiones en el punto de conexión, pero en caso de suministrar la cantidad necesaria vía batería de condensadores, no se absorbería potencia reactiva de la red.

- CURVAS P-V

En el extremo último de la curva se llega al colapso de tensiones produciéndose una caída acelerada de la tensión, con el consiguiente aumento de la energía reactiva.

Observando las curvas P-V se conoce la potencia que se puede inyectar en la red sin llegar al colapso de tensiones, es decir la potencia que el parque puede suministrar a la red. Si se trazara una línea que uniese los puntos extremos se observaría la curva en "forma de nariz". Cabe recordar que no se ha incluido reactiva mediante batería de condensadores; sino, la potencia inyectada a la red sería mayor. La Pcc se puede aumentar o disminuir la potencia inyectada. Al modificar la Pcc por debajo de 500 MVA se están simulando diferentes topologías de la red. Mayores valores de MVA significa que la red es más robusta y mallada, menores valores significa que la red es más débil y radial.

CAPÍTULO 6

COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTAS TRIFÁSICAS EN GENERACIÓN SÍNCRONA Y ASÍNCRONA

CAPÍTULO 6: COMPORTAMIENTO ANTE FALTAS DE GENERACIÓN SÍNCRONA Y ASÍNCRONA

6.1 COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTAS TRIFÁSICAS EN GENERACIÓN ASÍNCRONA

6.1.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina asíncrona frente a faltas trifásicas. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y par de máquina asíncrona.

6.1.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 6-1, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste se compone de cinco bloques: red, falta, transformador, medidas y máquina asíncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva. El dato del Par del rotor se obtendrá del generador asíncrono.

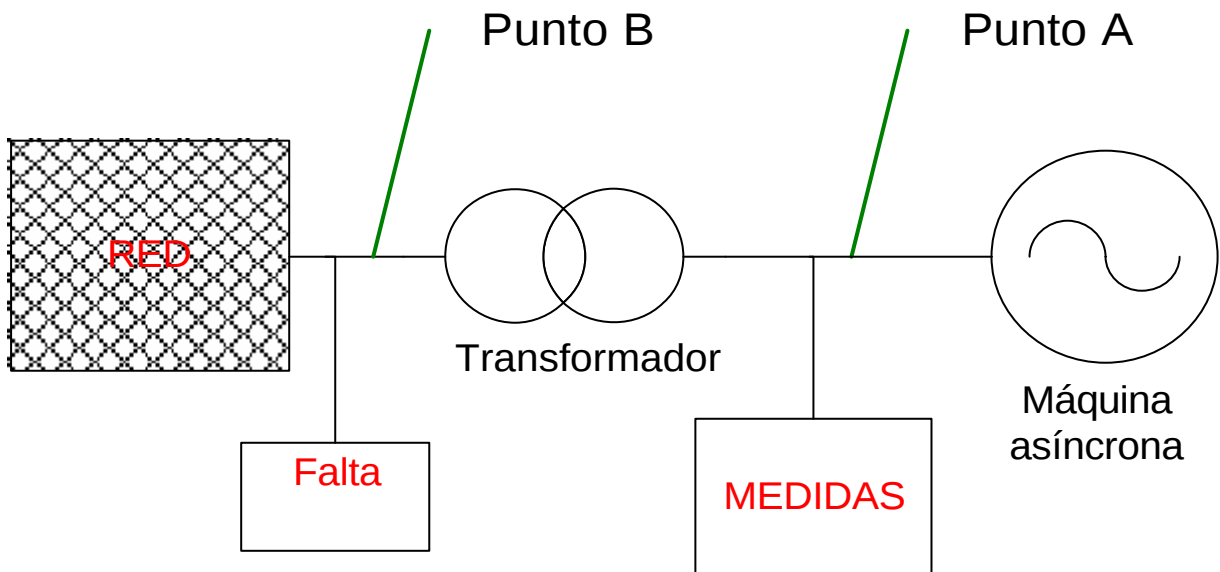


Gráfico 6 - 1 Esquema Unifilar.

6.1.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Se definirán a continuación los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. El par que alimenta la máquina es de 3660 N·m.

- BLOQUE DE RED

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase source	valores
Tensión fase-fase en valor eficaz (kV)	20
Desfase angular de la Fase A (grados)	0
Frecuencia (Hz)	50
Conexión interna	Yg
Potencia de cortocircuito (MVA)	10
Tensión base en valor eficaz para cortocircuito (kV)	20
Relación X/R de la Línea	10

Tabla 6 - 13.

- BLOQUE DEL TRANSFORMADOR

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase transformer	valores
Potencia nominal (MVA)	0.75
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase primario del transformador (kV)	20 / 0.69
Resistencia del primario (p.u.)	0.002
Reactancia del primario (p.u.)	0.008
Conexión primario	Y
Conexión secundario	Yg
Resistencia del secundario (p.u.)	0.002
Reactancia del secundario (p.u.)	0.008
Resistencia de magnetización (p.u.)	5000
Reactancia de magnetización (p.u.)	5000

Tabla 6 - 14.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR ASÍNCRONO

PARÁMETROS DEL BLOQUE asynchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Referencia	Rotor
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	690
Potencia nominal (KVA)	650
Resistencia del estator (ohm)	0.0073
Reactancia del estator (H)	0.0002387
Inductancia mutua (H)	0.0103
Resistencia del rotor (ohm)	0.0065
Reactancia del rotor (H)	0.0002864
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	2

Tabla 6 - 3.

▪ BLOQUE DE LA FALTA

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase FAULT	valores
Estado inicial de los seccionadores	cerrados
Interruptor de la fase A	Seleccionado
Interruptor de la fase B	Seleccionado
Interruptor de la fase C	Seleccionado
Resistencia de la falta (ohm)	30
Tiempo de transición (seg)	1 – 1.5

Tabla 6 – 4.

6.1.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 5 seg. La falta trifásica se producirá entre los segundos 1 y 1.5 en el punto B, como se indica en el gráfico 6-1. Se representará la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 6-2), la tensión y la intensidad (gráfico 6-3) y el par que suministra la máquina asíncrona (gráfico 6-4). Una vez pasado el transitorio provocado por la falta, los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 6- 5.

variables	valores
Tensión de línea (V)	674.3
Intensidad de línea (A)	538.1
Potencia activa (kW)	568.6
Potencia reactiva (kVar)	267.9
Potencia aparente (kVA)	628.5
Par (N·m)	3660

Tabla 6 – 5.

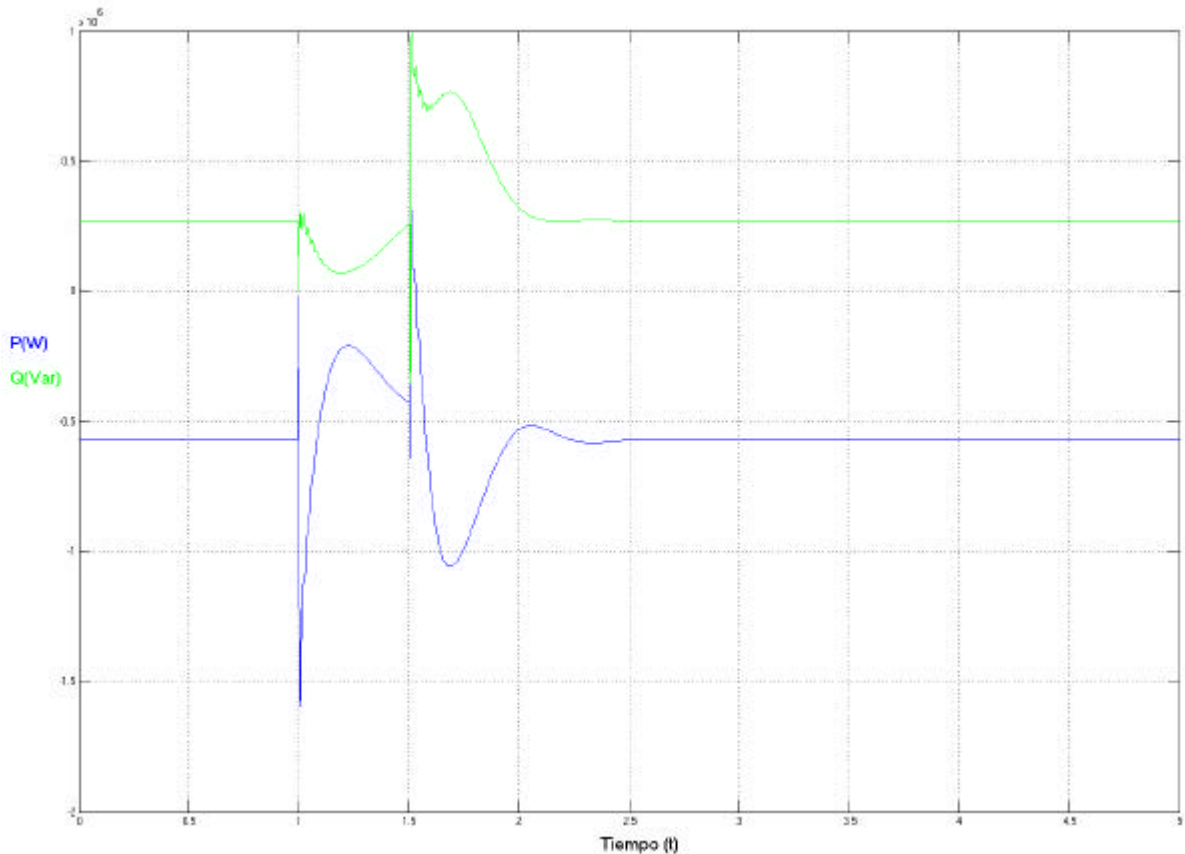


Gráfico 6 - 2 Potencia activa y reactiva.

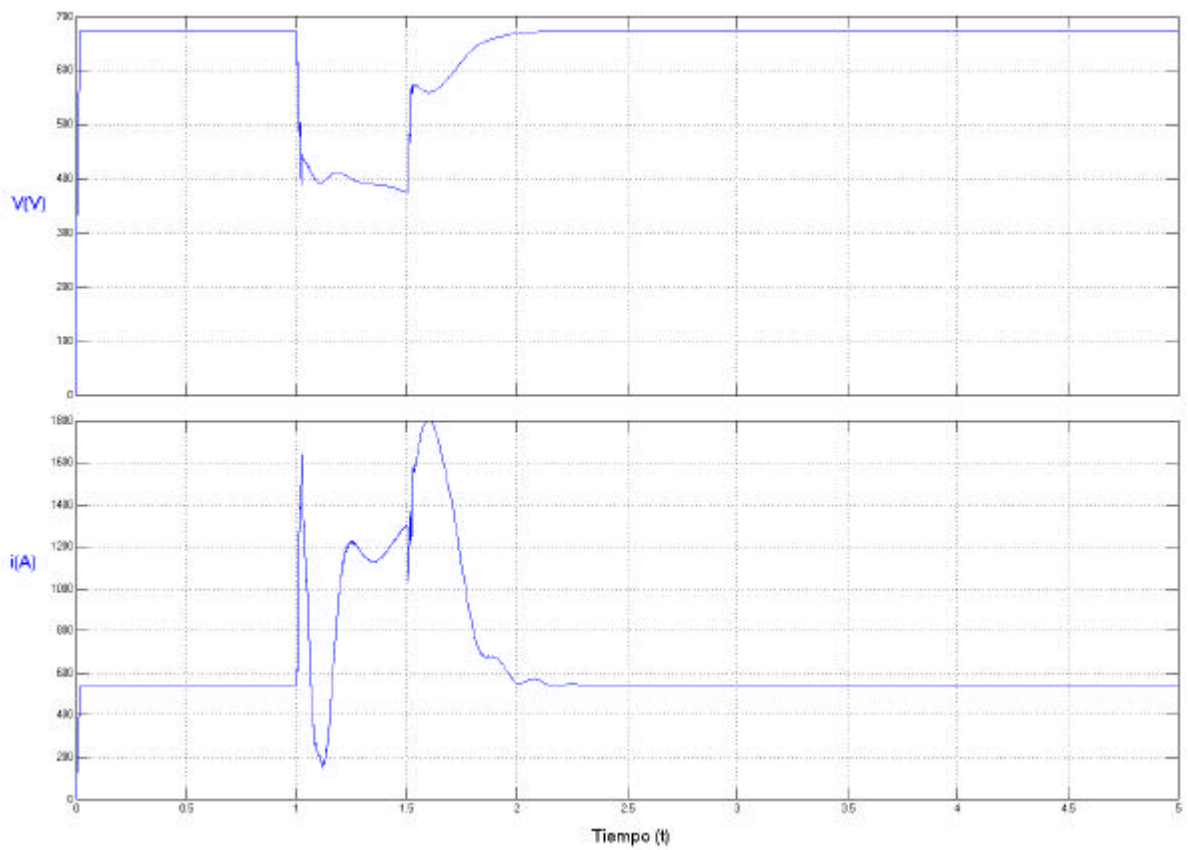


Gráfico 6 - 3 Tensión e intensidad eficaz

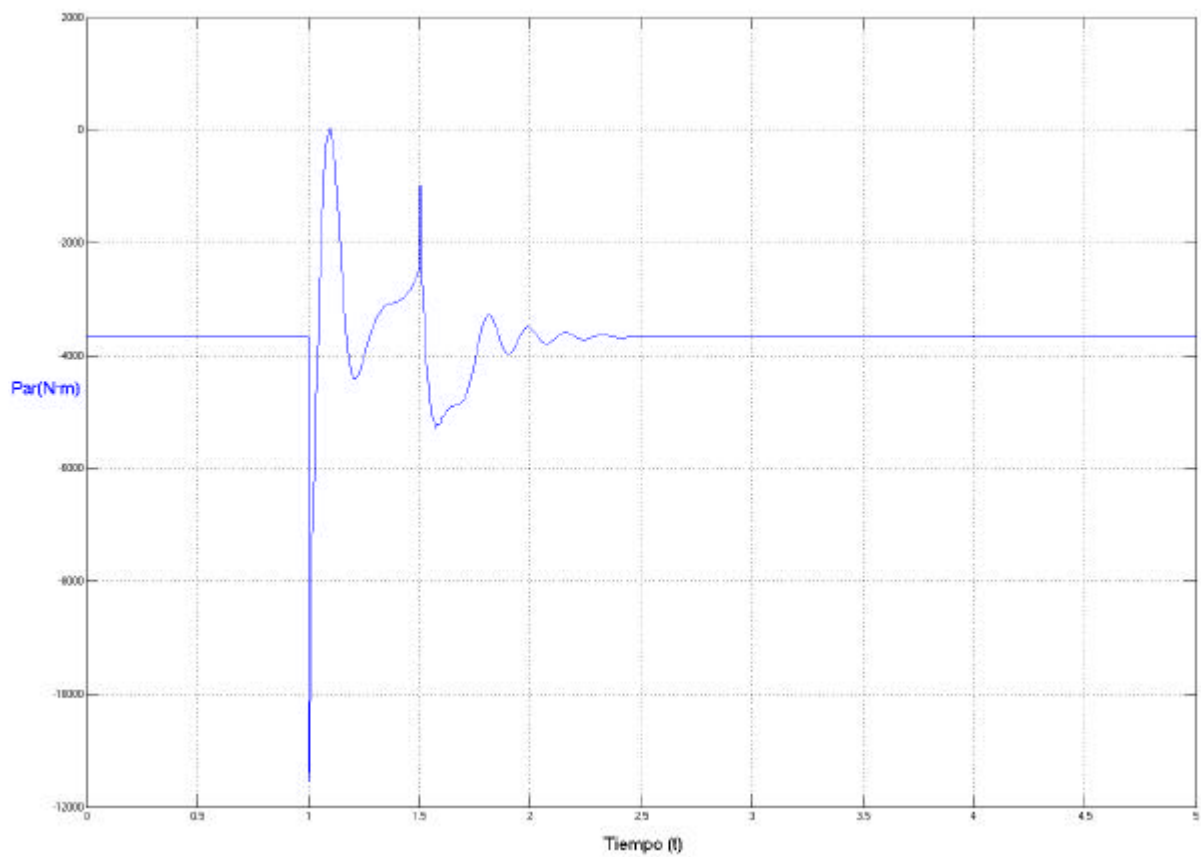


Gráfico 6 - 4 Par de la máquina asíncrona.

6.1.5 CONCLUSIONES

La primera conclusión que se puede extraer del gráfico 6-3 es que la máquina asíncrona o de inducción tiende a realimentar el hueco producido en la red. La forma del hueco de tensión dependerá en gran medida del valor de la potencia de cortocircuito que tenga la red. A mayor potencia de cortocircuito más rígida será la red, es decir, más potencia podrá entregar en ese punto de la red en caso de falta y por tanto el hueco se distorsionará menos.

Muy interesante es también la gráfica 6-4 que representa el par de la máquina. Inicialmente el par de generación y el par de carga se encuentran ajustados. Al producirse el hueco de tensión el par aumenta y en consecuencia la potencia activa también lo hace, hasta que la falta de tensión hace que no se pueda crear campo magnético y el par vaya disminuyendo.

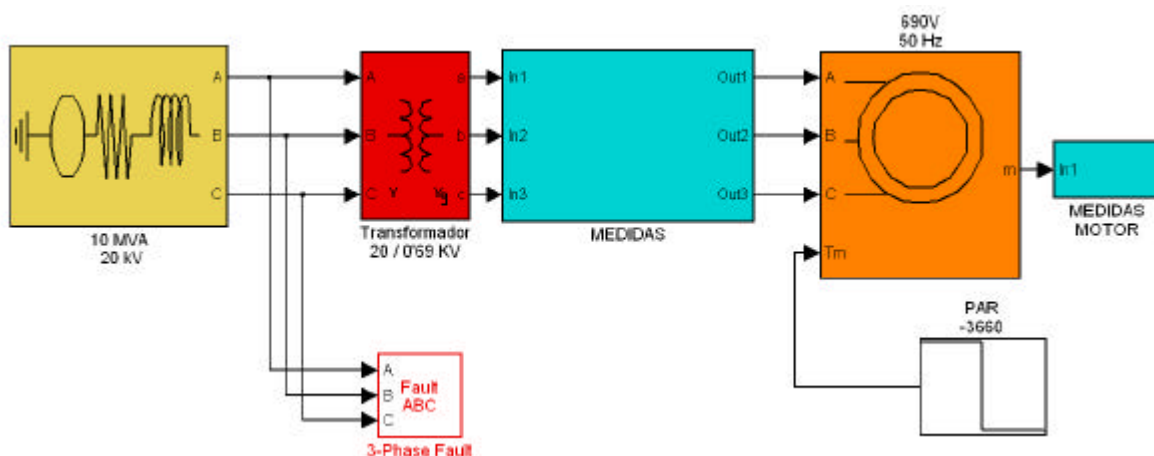


Gráfico 6 – 5 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 6-1.

6.2 COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTAS TRIFÁSICAS EN GENERACIÓN SÍNCRONA

6.2.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina síncrona frente a faltas trifásicas. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa y potencia reactiva.

6.2.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 6-6, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste se compone de cinco bloques: red, falta, transformador, medidas y máquina síncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

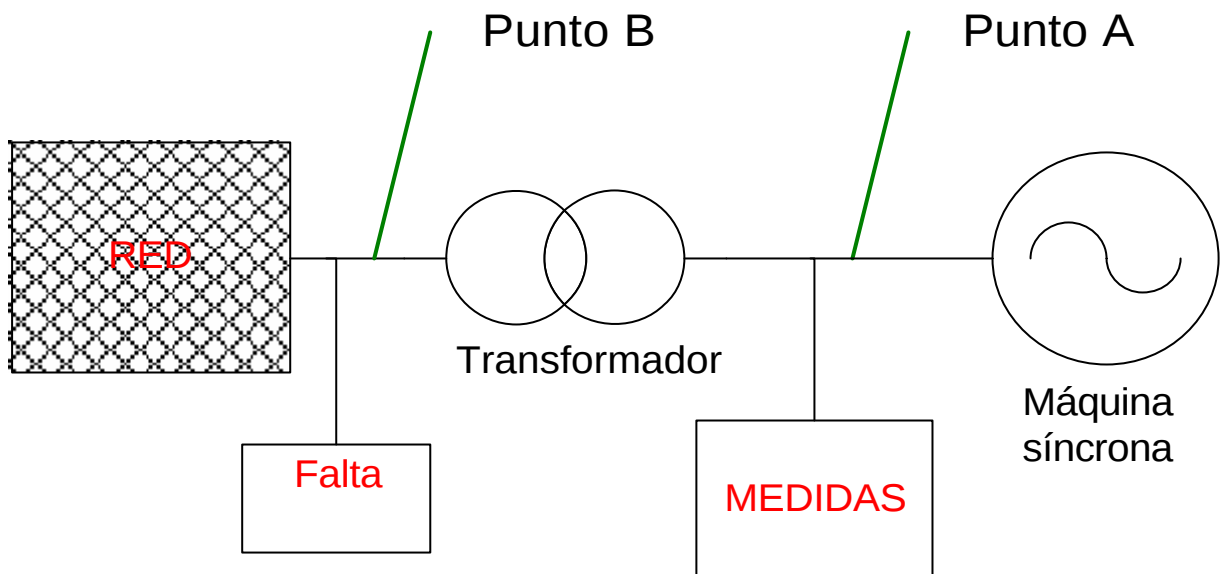


Gráfico 6 - 6 Esquema Unifilar.

6.2.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Se definirán a continuación los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. Los bloques de red, falta y transformador tienen los mismos parámetros que en la simulación 6.1, por lo podemos extrapolar sus valores a este apartado.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR SÍNCRONO

PARÁMETROS DEL BLOQUE synchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Polos salientes
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	400
Potencia nominal (KVA)	600
Resistencia del estator (pu)	0.00285
Reactancia del estator (pu)	0.114
Reactancia mutua del estator eje d (pu)	1.19
Reactancia mutua del estator eje q (pu)	0.36
Resistencia de campo (pu)	0.000579
Reactancia de campo (pu)	0.114

Resistencia amortiguadora eje d (pu)	0.0117
Reactancia amortiguadora eje d (pu)	0.182
Resistencia amortiguadora eje q (pu)	0.0197
Reactancia amortiguadora eje q (pu)	0.384
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	20

Tabla 6 – 6.

6.2.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 5 seg. La falta trifásica se producirá entre los segundos 1 y 1.5 en el punto B, como se indica en el gráfico 6-6. Se observará la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 6-7) y de la tensión y la intensidad (gráfico 6-8). Una vez pasado el transitorio provocado por la falta los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 6- 7.

variables	valores
Tensión de línea (V)	402.1
Intensidad de línea (A)	864.4
Potencia activa (kW)	601.8
Potencia reactiva (kVar)	0.31
Potencia aparente (kVA)	602.2

Tabla 6 – 7.

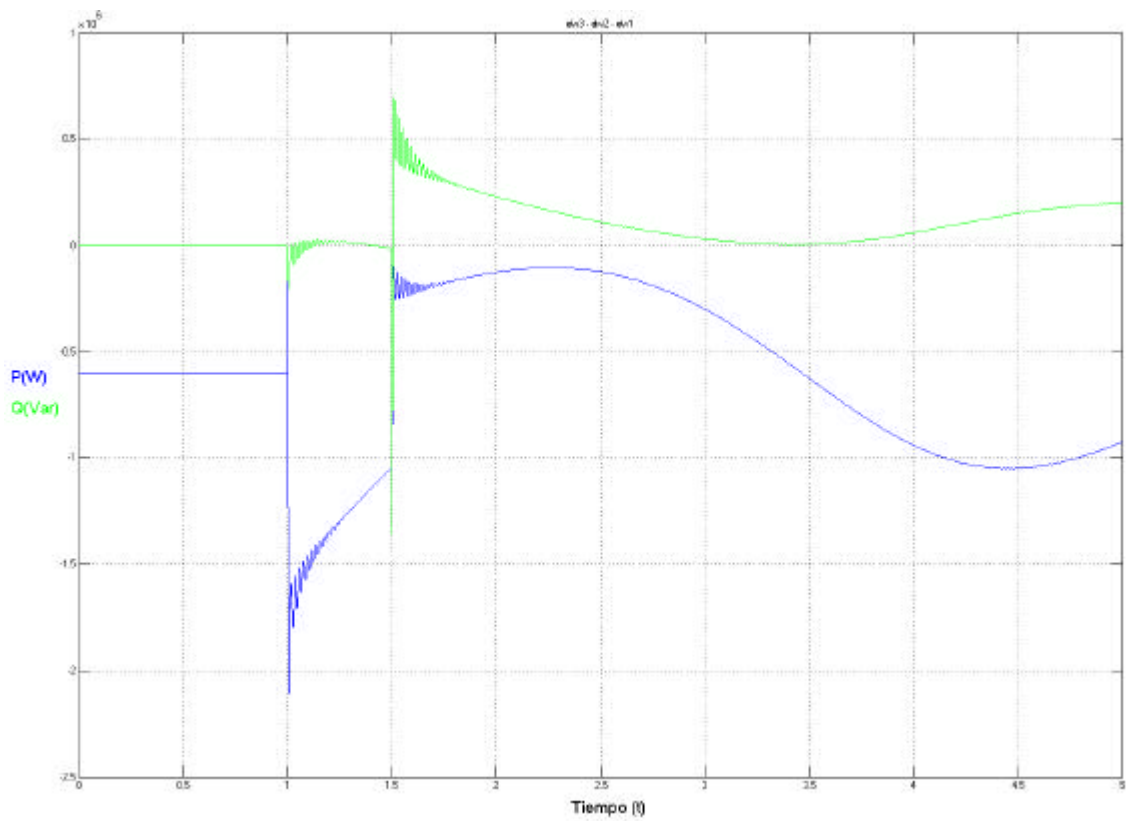


Gráfico 6 - 7 Potencia activa y reactiva.

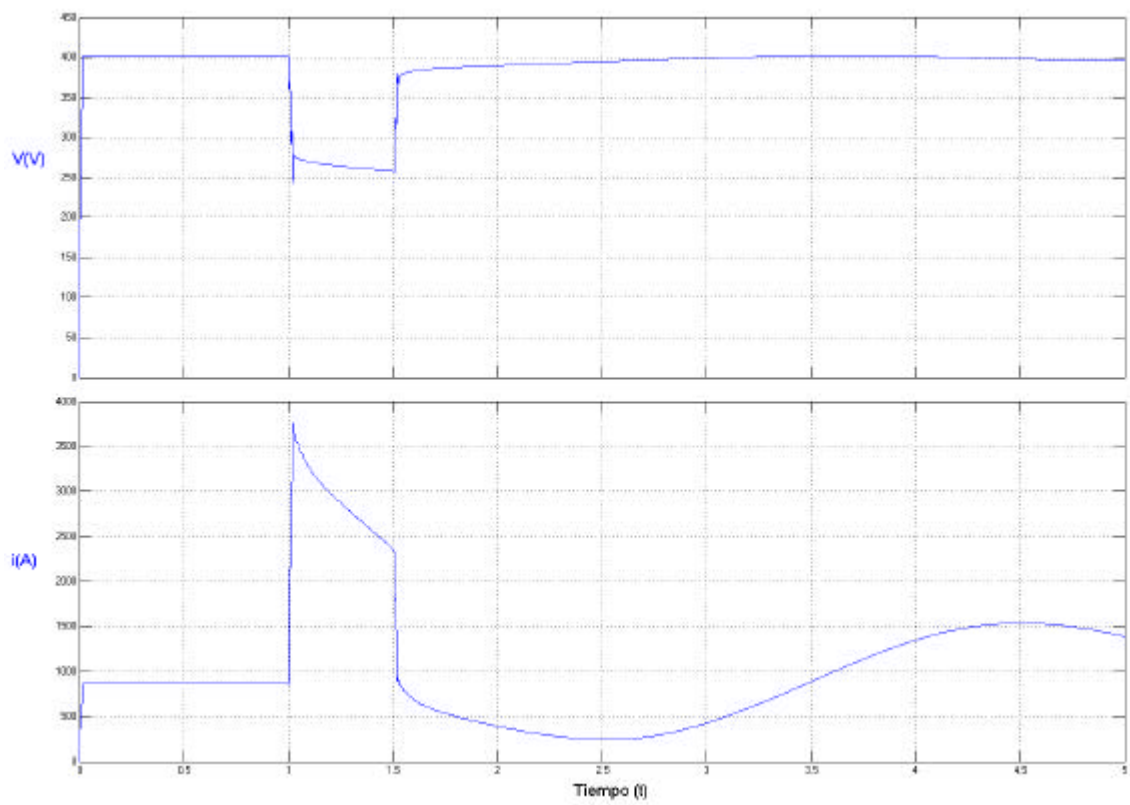


Gráfico 6 - 8 Tensión e intensidad eficaz

6.2.5 CONCLUSIONES

Comparando los resultados obtenidos con la simulación 6-1, para el mismo tipo de falta, la máquina síncrona parece tener un comportamiento más estable aunque alarga un poco más el tiempo de recuperación de las tensiones. La caída de tensión en la máquina asíncrona es un 10% mayor que para la máquina síncrona, además la de realimentación del hueco de tensión que se produce en la máquina asíncrona. Se puede afirmar que el comportamiento de la máquina síncrona sea mejor que el de la asíncrona.

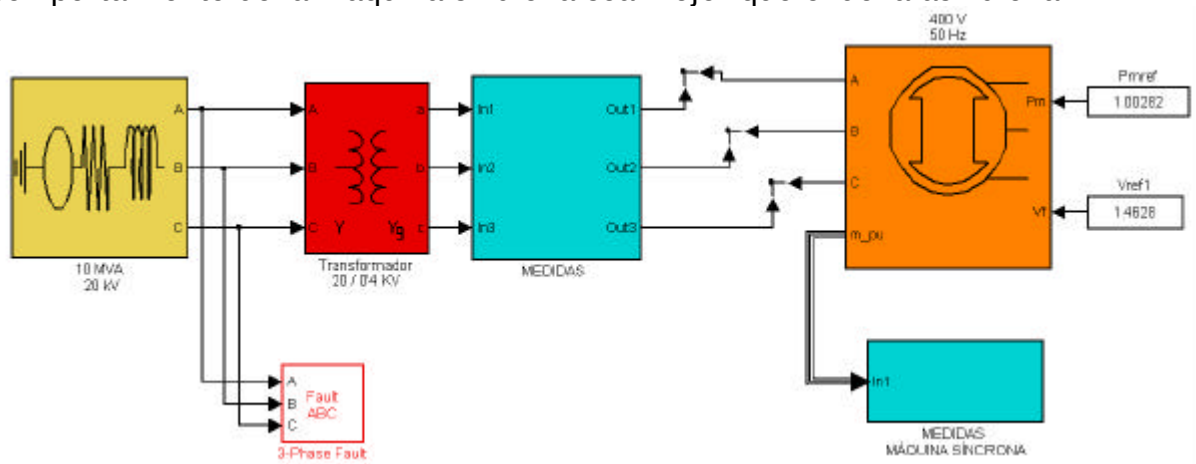


Gráfico 6 – 9 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 6-2.

De forma didáctica, se incluye la gráfica 6-7 bis, realizada con los mismos datos pero con una tensión de 690 V en bornas de la máquina para hacer una comparación (con iguales tensiones) con la gráfica 6-3 de la simulación 6-1.

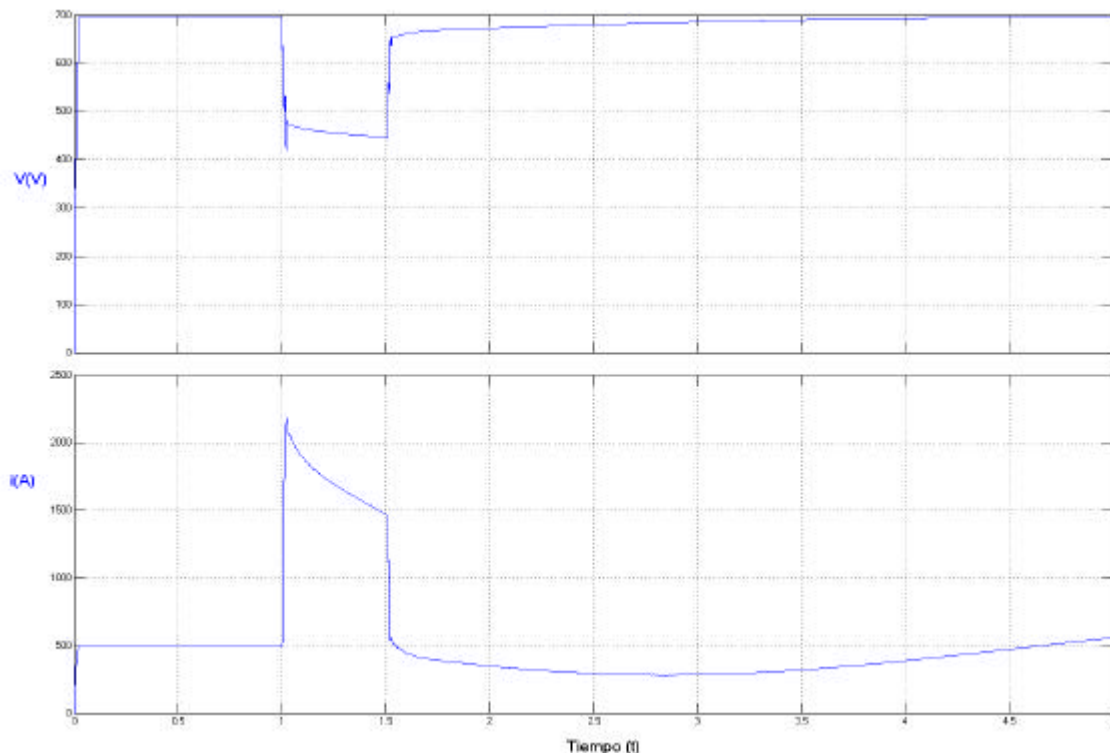


Gráfico 6 - 7 bis. Potencia activa y reactiva eficaz

6.3 COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTAS MONOFÁSICAS EN GENERACIÓN ASÍNCRONA

6.3.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina asíncrona frente a faltas monofásicas. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva.

6.3.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el mismo que el de la simulación 6-1 (gráfico 6-1), representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste se compone de cinco bloques: red, falta, transformador, medidas y máquina asíncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

6.3.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Se definirán a continuación los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. El par que alimenta la máquina es de 3785 N·m. Los bloques de la red, la máquina asíncrona y transformador tienen los mismos parámetros que en la simulación 6.1, por lo que podemos extrapolar sus valores a este apartado. Únicamente varía el bloque de la falta ya que en este caso es monofásica.

- BLOQUE DE LA FALTA

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase FAULT	valores
Estado inicial de los seccionadores	cerrados
Interruptor de la fase A	Seleccionado
Interruptor de la fase B	No Seleccionado
Interruptor de la fase C	No Seleccionado
Resistencia de la falta (ohm)	30
Timepo de transición (seg)	1 – 1.5

Tabla 6 – 8.

La simulación se ejecutará durante 5 seg. La falta monofásica se producirá entre los segundos 1 y 1.5 en el punto B (gráfico 6-1). Se

representará la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 6-10), la tensión y la intensidad (gráfico 6-11) . Una vez pasado el transitorio provocado por la falta los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 6- 9.

variables	valores
Tensión de línea (V)	674.3
Intensidad de línea (A)	538.1
Potencia activa (kW)	568.6
Potencia reactiva (kVar)	267.9
Potencia aparente (kVA)	628.5
Par (N·m)	3785

Tabla 6 – 9.

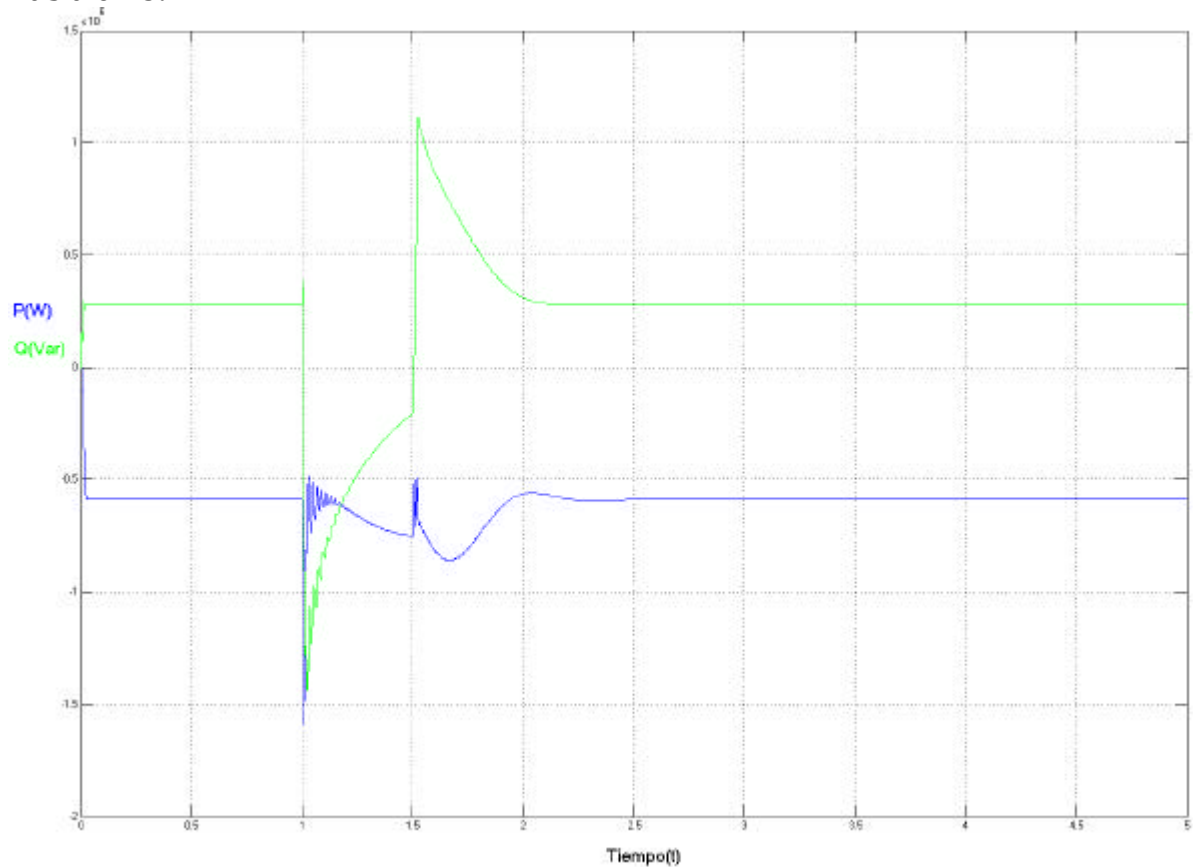


Gráfico 6 - 10 Potencia activa y reactiva.

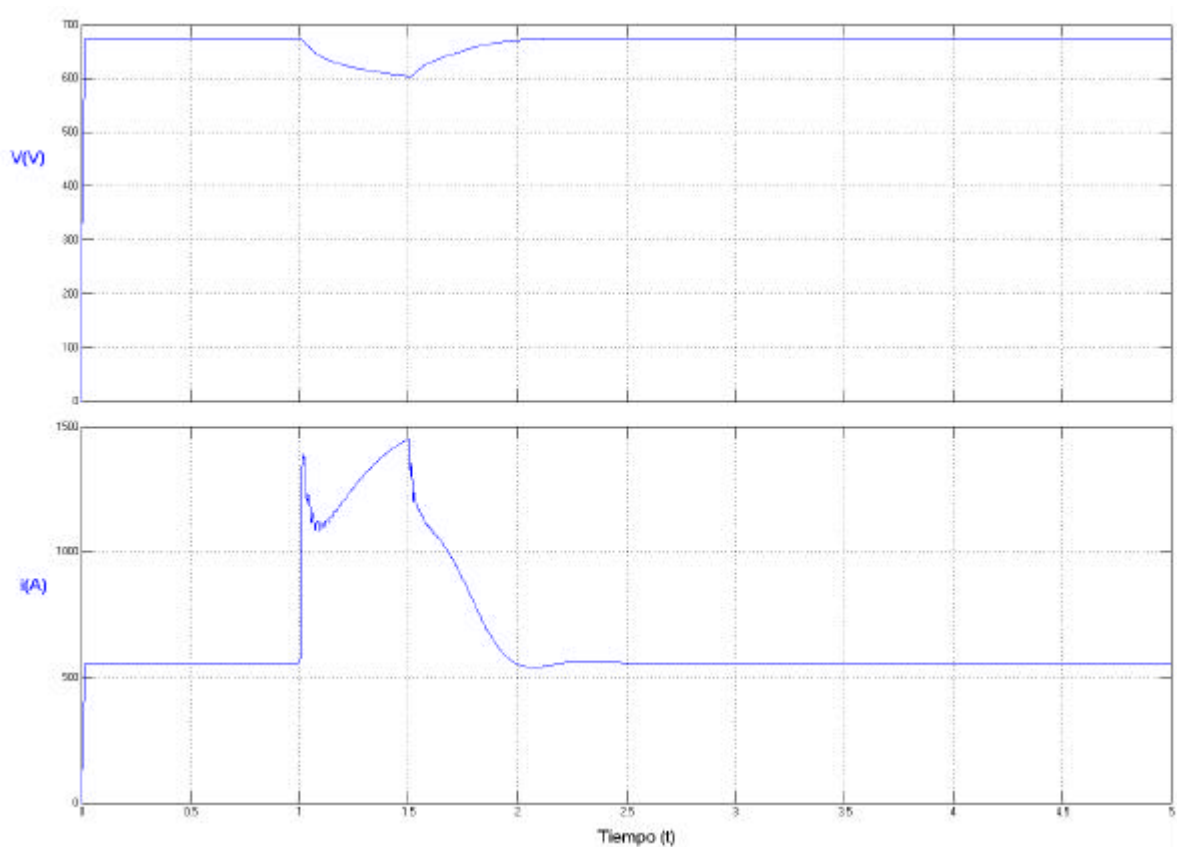


Gráfico 6 - 11 Tensión e intensidad eficaz.

6.3.5 CONCLUSIONES

Para esta simulación se ha vuelto a utilizar el mismo valor de resistencia de la falta para poder comparar en igualdad de condiciones el comportamiento frente a faltas trifásica y monofásicas. La falta trifásica resulta más perjudicial puesto que en la monofásica hay dos fases que están alimentando a la máquina. El hueco que se produce es inferior al del caso trifásico como se puede observar en el gráfico 6-11, reponiéndose el valor de las tensiones en unos 0.5 segundos.

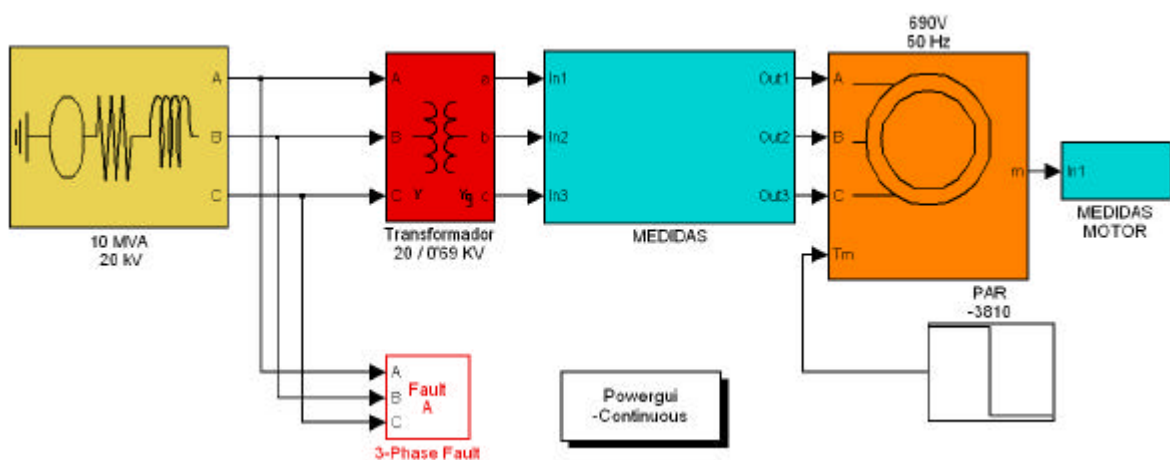


Gráfico 6 – 12 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 6-3.

6.4 COMPORTAMIENTO FRENTE A FALTAS MONOFÁSICAS EN GENERACIÓN SÍNCRONA

6.4.1 OBJETO

Estudiar el comportamiento de una máquina síncrona frente a faltas monofásicas. Evolución de las magnitudes de tensión, intensidad, potencia activa y potencia reactiva.

6.4.2 ESQUEMA UNIFILAR Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El esquema unifilar empleado para este modelo es el que se observa en el gráfico 6-6, representando el sistema eléctrico a estudiar. Éste se compone de cinco bloques: red, falta, transformador, medidas y máquina síncrona. El bloque de medidas se conectará en el punto A. En el interior del bloque se tomarán las medidas de tensión de línea, la intensidad de línea y los flujos de potencia, tanto activa como reactiva.

6.4.3 DATOS

DATOS DE LOS BLOQUES EMPLEADOS

Se definirán a continuación los valores de los parámetros de cada uno de los bloques que intervienen en el desarrollo de la simulación. Los bloques de red y transformador tienen los mismos parámetros que en la simulación 6.1, por lo podemos extrapolar sus valores a este apartado. Los parámetros del bloque del generador y de la falta se expresan a continuación en las tablas 6-10 y 6-11.

▪ BLOQUE DEL GENERADOR SÍNCRONO

PARÁMETROS DEL BLOQUE synchronous machine si units	valores
Tipo de rotor	Polos salientes
Frecuencia (Hz)	50
Tensión fase-fase (V)	400
Potencia nominal (KVA)	600
Resistencia del estator (pu)	0.00285
Reactancia del estator (pu)	0.114
Reactancia mutua del estator eje d (pu)	1.19
Reactancia mutua del estator eje q (pu)	0.36
Resistencia de campo (pu)	0.000579

Reactancia de campo (pu)	0.114
Resistencia amortiguadora eje d (pu)	0.0117
Reactancia amortiguadora eje d (pu)	0.182
Resistencia amortiguadora eje q (pu)	0.0197
Reactancia amortiguadora eje q (pu)	0.384
Inercia (Kg · m ²)	180
Pares de polos	20

Tabla 6 – 10.

▪ BLOQUE DE LA FALTA

PARÁMETROS DEL BLOQUE 3-phase FAULT	valores
Estado inicial de los seccionadores	cerrados
Interruptor de la fase A	Seleccionado
Interruptor de la fase B	No Seleccionado
Interruptor de la fase C	No Seleccionado
Resistencia de la falta (ohm)	30
Tiempo de transición (seg)	1 – 1.5

Tabla 6 – 11.

6.4.4 RESULTADOS

La simulación se ejecutará durante 5 seg. La falta monofásica se producirá entre los segundos 1 y 1.5 en el punto B, como se indica en el gráfico 6-6. Se observará la evolución de la potencia activa y reactiva (gráfico 6-13) y de la tensión y la intensidad (gráfico 6-14). Una vez pasado el transitorio provocado por la falta los valores de cada una de las variables son los descritos en la tabla 6- 12.

variables	valores
Tensión de línea (V)	400.1
Intensidad de línea (A)	760.4
Potencia activa (kW)	525.2
Potencia reactiva (kVar)	37.5
Potencia aparente (kVA)	526.9

Tabla 6 – 12.

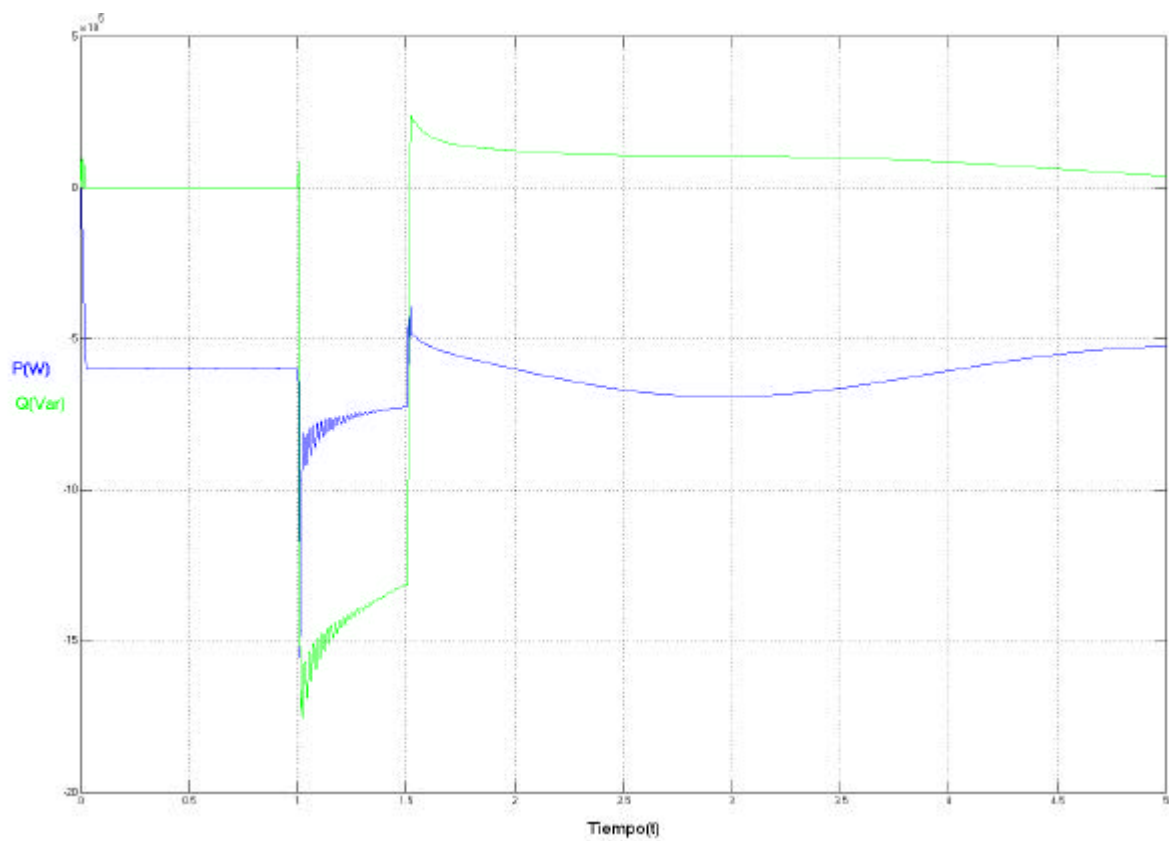


Gráfico 6 - 13 Potencia activa y reactiva.

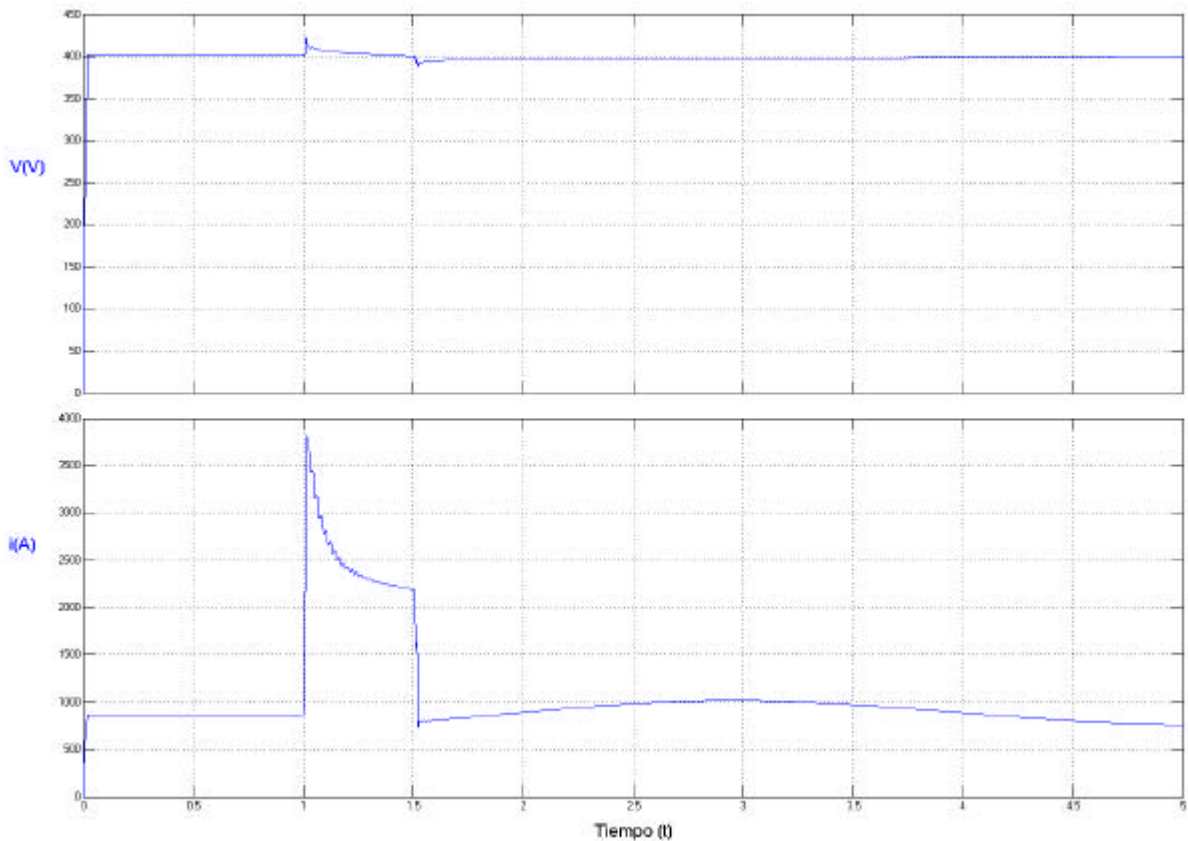


Gráfico 6 - 14 Tensión e intensidad eficaz.

6.4.5 CONCLUSIONES

El comportamiento de la máquina síncrona en este caso es mejor que el de la máquina asíncrona sobretodo en lo que se refiere al nivel de las tensiones. En este caso apenas afecta a las tensiones aunque se observa que la máquina cede energía reactiva a la red ya que el valor de la excitación permanece constante durante la falta. Para la falta monofásica si se puede afirmar, por los resultados obtenidos que la máquina síncrona se comporta mejor.

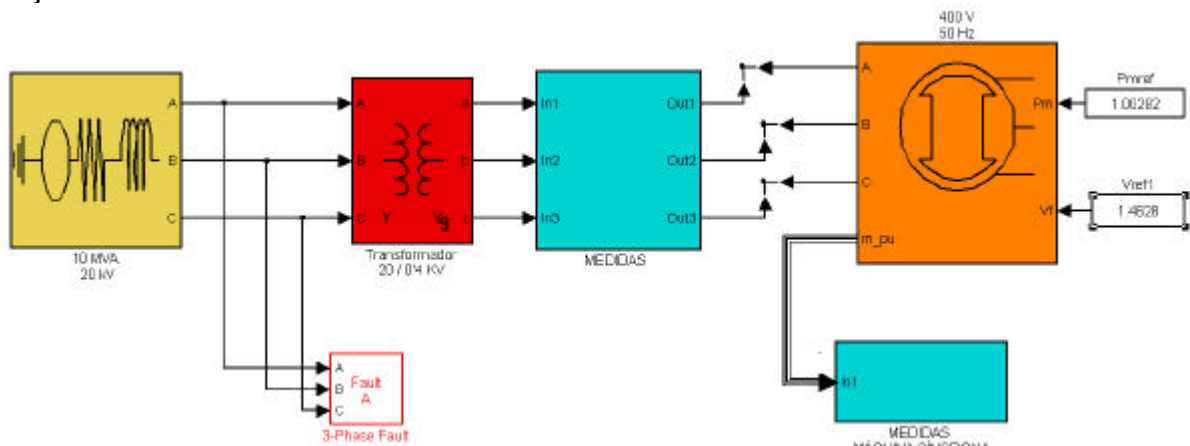


Gráfico 6 – 15 Esquema básico empleado en Simulink para la simulación 6-4.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antonio Gómez Expósito. (2002) "Análisis y operación de sistemas eléctrica".
- [2] Enrique Ras Oliva. (1994) "Transformadores de potencia de medida y de protección".
- [3] Manuel Cortes Cherta. (1994) "Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo 4, máquinas síncronas y motores c.a. de colector".
- [4] Manuel Cortes Cherta. (1994) "Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo 3, máquinas de corriente alterna asíncronas".
- [5] Oriol Boix. "Tecnología eléctrica".
- [6] A. Ríos Villacorta. "Límites de la capacidad de regulación de un parque eólico con aerogeneradores de velocidad variable".
- [7] D. Galvan (2002). "Análisis de generación eólica de sistemas eléctricos de potencia".
- [8] Walmir Freitas (2006). "Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications".
- [9] Salman K. Salman (2003). "Windmill modelling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator".
- [10] Manuel Casal (2004). "Apuntes de Instalaciones eléctricas 4º curso ingeniería industrial".
- [11] Antonio de la Villa Jaén (2005). "Apuntes de Centrales Eléctricas y protecciones".