



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES:
GENERACIÓN ELÉCTRICA

Título del proyecto:

HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA
CAPACIDAD BUS EN SISTEMAS MADA

Alumno: ÁLVARO ITOIZ DONAMARÍA

Tutor Upna: JESÚS LÓPEZ TABERNA

Tutor empresa: IKER ESANDI ÚRIZ

Pamplona, 29 de mayo de 2015

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Penetración de la MADA	3
1.2. Problemática de la MADA	5
1.3. Endurecimiento de los códigos de red	6
1.4. Objetivo del proyecto	8
2. DEPENDENCIA DE LA CAPACIDAD DE BUS	10
2.1. Funcionamiento de la capacidad en permanente	10
2.2. Funcionamiento de la capacidad en transitorios	11
2.3. Variables que afectan al dimensionado de la capacidad	11
3. MODELADO Y PROGRAMA DE CÁLCULO EN MATLAB	13
3.1. Distintos m-files y su uso	13
a) Inicio_codigo	13
b) Inicio_codigo_con_datos	14
c) Parametros_G8X_V3_2	15
d) Parametros_practica_master	15
e) Calculo_Cbus_V2	15
f) Calculo_Cbus_V1	16
g) Calculo_Cbus_V3	16
h)Codigo_gui	16
i) Dibujado_Cbus	17
j) informacion_graficas	17
k) Solucion_errores	17
3.2. Modos de ejecución y requisitos	18
3.2.1. Ejecución del programa al completo	18
a) Calculo_Cbus_V2	19
b) Calculo_Cbus_V1	20
c) Calculo_Cbus_V3	21
3.2.2. Ejecución del programa para dibujar datos	22
3.3. Modelo de prácticas del Máster de EE.RR. con control en C (Simulink)	22
a) Modelización de la red y generador de huecos.	22

b)	Máquina asíncrona utilizada	23
c)	Convertidor de lado de máquina y protecciones mediante choppers	23
d)	Lazo de control y generación de señales de disparo de IGBTs	24
e)	Calculo de flujos y tensiones inducidas	25
f)	PI analógico	25
3.4.	Variables que se introducen al modelo de Simulink	25
3.5.	Variables necesarias para el funcionamiento de cualquier m-file	26
4.	MANUAL DE USUARIO	29
4.1.	Introducción	29
4.2.	Cálculo y dibujado de las capacidades	29
4.2.1.	“Inicio_codigo”	30
4.2.2.	“Parametros G8X_V3_2”	33
4.2.3.	Simulación	33
4.3.	Cálculo de las capacidades	36
4.4.	Dibujado de las capacidades	36
5.	CONCLUSIONES	37
6.	LÍNEAS FUTURAS	39
6.1.	Dimensionado en corriente	39
6.2.	Aceleración de la simulación	39
6.3.	Validación del modelo de Simulink y solución de errores	40
6.4.	Trabajo con frecuencias de conmutación bajas	41
7.	BIBLIOGRAFÍA	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: potencia eólica acumulada en todo el mundo.	1
Figura 2: evolución del LCOE de generación eólica en los últimos 30 años [5].	2
Figura 3: LCOE de energías renovables y fuentes de generación convencionales en Alemania (2013). Los valores bajo fotovoltaica se refieren a la irradiancia global horizontal en kWh/(m ² a), mientras que para las otras tecnologías se establecen el número de horas anuales en operación nominal. Las inversiones han sido tenidas en cuenta con el mínimo y máximo valor para cada tecnología.	3
Figura 4: Esquemas de las diferentes topologías en generación eólica [7].	4
Figura 5: Penetración de mercado en porcentaje de las distintas topologías según los años. (Datos aproximados)	5
Figura 6: Potencia reactiva requerida para energía eólica en caso de hueco de tensión en Sudáfrica.	6
Figura 7: Código de red de Sudáfrica para huecos de tensión.	7
Figura 8: Códigos de red para huecos de tensión en distintos países.	7
Figura 9: Porcentaje aproximado en los cuales se divide el coste total de un aerogenerador.	9
Figura 10: Visualización de la pantalla que se le presenta el usuario para dibujar los valores de capacidad calculados.	34
Figura 11: figura obtenida al dibujar los valores de capacidad de bus calculados para determinadas condiciones.	35
Figura 12: pantalla de parámetros desplegada al clicar el botón “+ info” de la GUI.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos obtenidos de la simulación en el modelo de Ingeteam para la versión 1 y 2.	18
Tabla 2: Datos obtenidos de la simulación en el modelo sistema_Mada_control_s para la versión 1 y 2.	19

1. INTRODUCCIÓN

Desde la creación de la primera turbina eólica para generación eléctrica en 1888 (Charles F. Brush) esta tecnología ha experimentado un gran avance. Durante el siglo XX los aerogeneradores fueron adquiriendo la imagen que hoy día tenemos de ellos, es decir, sufrieron una reducción del número de palas y un aumento de la velocidad de giro.

En la última parte del siglo XX debido a varias crisis del modelo energético y gracias a políticas estatales de ayuda (sobre todo en la última década del siglo) la implantación de aerogeneradores sufrió un crecimiento exponencial (*Figura 1*). Otros factores importantes para su crecimiento fueron: la economía de escalas, la introducción de la informática, el desarrollo de la electrónica de potencia,...

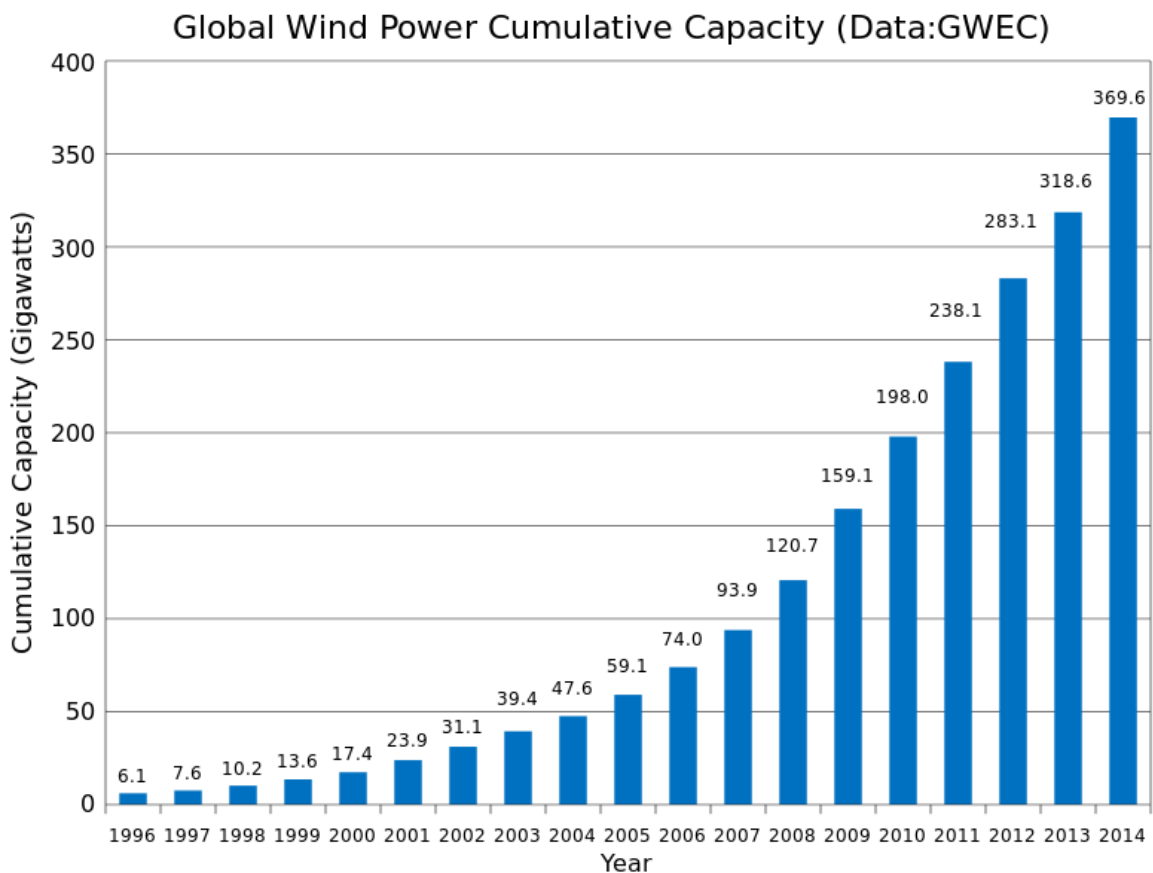


Figura 1: potencia eólica acumulada en todo el mundo.

En la gráfica anterior (*Figura 1*) se representan datos mundiales, a continuación se dan los datos Europeos a finales de 2014: la potencia instalada era de un total de 128.751 MW. En un año de viento normal, dicha potencia produciría 257 TWh, lo que significaría el abastecimiento del 8% del consumo eléctrico europeo aproximadamente.

A medida que ha crecido su implantación los aerogeneradores han experimentado una enorme bajada de los costes de fabricación, lo cual está ayudando a su mayor crecimiento. Para poder comparar el precio de las distintas tecnologías de generación, teniendo en cuenta el mayor número de parámetros, existe un indicador denominado LCOE (Levelized Cost Of Electricity).

Este indicador lo que hace es una división (Ecuación 1) de los costes de construcción, operación y mantenimiento de las centrales en su vida útil entre la energía total generada en la misma vida útil. El LCOE puede ser visto también como el indicador mediante el cual se recibe una estimación del precio al cual tiene que ser generada la energía para que la amortización del proyecto se dé antes del final de la vida útil de la central, parque eólico, huerta solar,... [4]

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Donde:

- LCOE: Levelized Cost Of Electricity (coste de la electricidad nivelado).
- I_t : Inversiones realizadas en el año t
- M_t : Gastos de operación y mantenimiento del año t
- F_t : Gastos de combustible en el año t
- E_t : Electricidad generada en el año t
- r : Tasa de descuento
- n : Años de vida del sistema

En la siguiente figura (Figura 2) se observa la disminución del LCOE de generación eólica en los últimos 30 años.

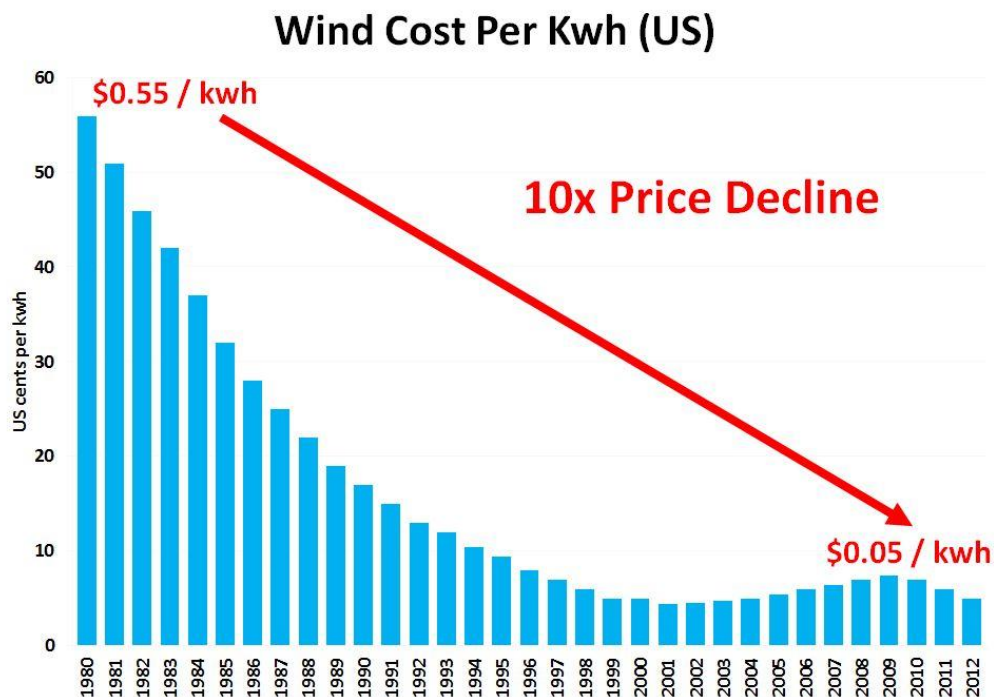


Figura 2: evolución del LCOE de generación eólica en los últimos 30 años [5].

En la anterior gráfica (Figura 2) se ve cómo en los últimos años se ha experimentado un “estancamiento” e incluso un incremento en los costes debido a que la tecnología actual ya es madura (el “estancamiento”) y debido a la crisis económica (incremento de precios al reducirse las ayudas).

Debido a que en algunos momentos el coste de la energía ha crecido levemente, el esfuerzo de las distintas compañías por la reducción de costes ha sido mayor, y actualmente, es una de las principales vías de estudio. Gracias a este esfuerzo, se ha conseguido que la energía eólica sea competitiva con el resto de formas de generación, tal y como se demuestra en el estudio alemán [6] del cual destaca la gráfica de LCOE (Figura 3) de las distintas formas de generación:

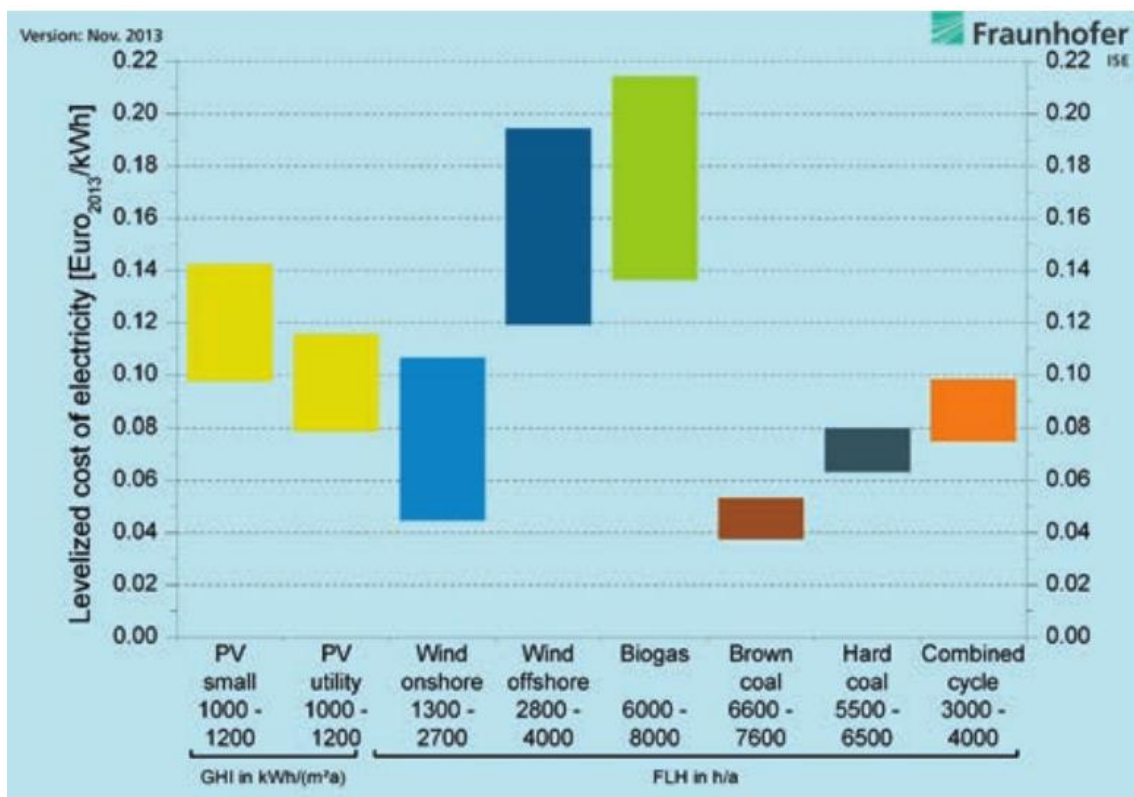


Figura 3: LCOE de energías renovables y fuentes de generación convencionales en Alemania (2013). Los valores bajo fotovoltaica se refieren a la irradiancia global horizontal en kWh/(m²a), mientras que para las otras tecnologías se establecen el número de horas anuales en operación nominal. Las inversiones han sido tenidas en cuenta con el mínimo y máximo valor para cada tecnología.

1.1. Penetración de la MADA

Una vez ha sido establecido el marco en el que se encuentra la energía eólica tanto en potencia como en precio de la energía generada, se focaliza el proyecto en una técnica de generación eólica.

Actualmente, en energía eólica, existen dos topologías principales de generación: full-converter y Dfig (Double Feed Induction Generator). La mayor diferencia entre ambas es el tipo de generador y convertidor utilizado para la generación eléctrica.

El proyecto se centrará en las máquinas Dfig o también conocidas como MADA (Máquina Asíncrona Doblemente Alimentada). Por lo tanto, lo primero que se estudia para tener una mejor comprensión, es la penetración de mercado que tiene esta topología y la problemática que acarrea.

Los datos que se han encontrado (*Figura 5*) remarcan la idea de la existencia de dos tecnologías principales [4 y 5] y otras dos que son anticuadas y están en decadencia. Del mismo modo, dan una idea de la gran cantidad de máquinas Dfig que se encuentran instaladas. Los distintos tipos de máquinas se pueden ver en el siguiente esquema (*Figura 4*):

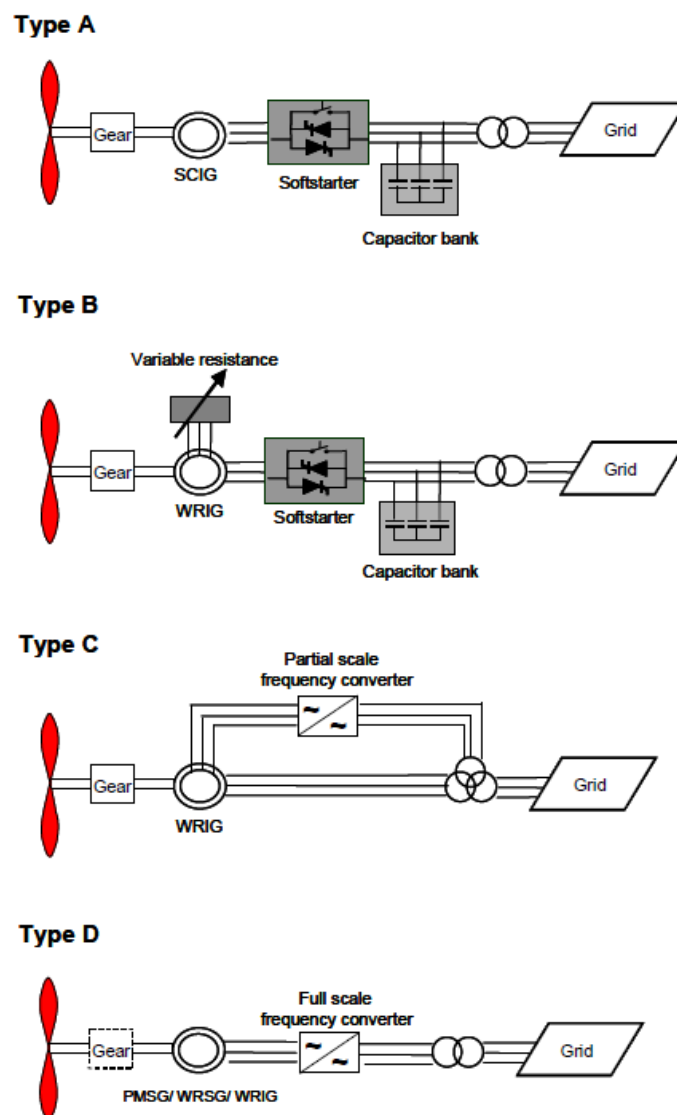


Figura 4: Esquemas de las diferentes topologías en generación eólica [7].

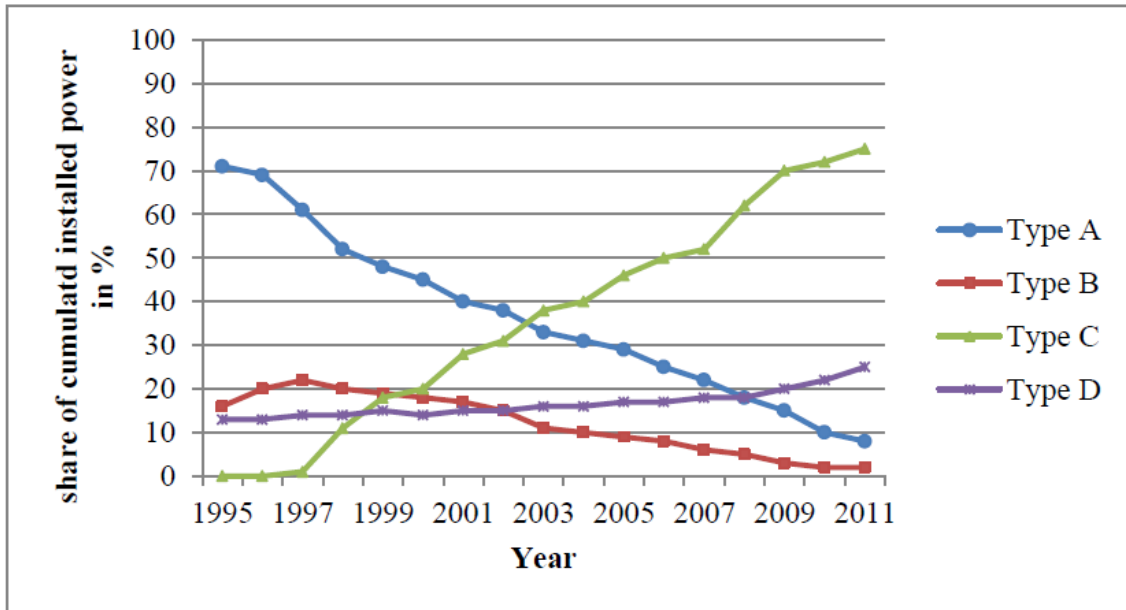


Figura 5: Penetración de mercado en porcentaje de las distintas topologías según los años. (Datos aproximados)

Se observa (Figura 5) como la tecnología predominante es aquella en la que se basa el proyecto. Si bien, hay que destacar que en los últimos años, los cuales no están representados en la gráfica, la tecnología Full-converter (Type D) ha ido recortando mercado a la MADA (Type C).

Algunos escritos [8] dan razones a cerca de la predominancia de la topología Dfig:

- El elevado precio de las tierras raras que forman los imanes permanentes de los que se compone el generador de la full-converter dificultan la competencia en precios frente a la MADA.
- La paralización debido a la crisis de los parques off-shore ha hecho que la demanda de la tecnología full-converter sea menor, ya que predominaba en aerogeneradores marinos por su menor necesidad de mantenimiento.
- El poder del mercado chino, que sigue manteniendo principalmente la topología Dfig con precios inferiores, ha servido de freno para la full-converter.

1.2. Problemática de la MADA

A medida que la penetración en el mercado eléctrico de energía eólica ha crecido, y a medida que la MADA ha sido la tecnología principalmente implantada, se han hecho más relevantes los problemas que esta topología presenta frente a variaciones de la tensión de red.

La caída de tensión en una o más fases de la red provoca sobrecorrientes y sobretensiones en los devanados del rotor que pueden hacer peligrar el convertidor electrónico que se encuentra conectado a él.

Las perturbaciones en la red eléctrica provocan que la fuerza electromagnética inducida en el rotor aumente notablemente, pudiendo llegar a la pérdida de control por saturación del convertidor. Dicha pérdida de control puede hacer que las sobretensiones en el bus de continua del convertidor sean muy superiores a la permitida y por tanto provocar destrucciones de componentes en caso de no tener sistemas de protección.

Actualmente, existen sistemas de protección [1], pero el endurecimiento de los códigos de red hace que sean necesarias nuevas soluciones.

1.3. Endurecimiento de los códigos de red

Con el aumento de la penetración de la generación eólica en el mercado eléctrico se han creado normativas nuevas que influyen a esta tecnología. Esto se debe a que su comportamiento frente a perturbaciones de red no es el adecuado (en caso de la MADA) y su repercusión en el sistema eléctrico ya no es insignificante como lo podía ser hace unos años. Las normativas son muy dependientes del país que las haga (*Figura 8*) y de la fortaleza de la red eléctrica de dicho país, por tanto, los requisitos de cumplimiento pueden variar enormemente.

Las empresas actualmente quieren ser capaces de adaptarse a cualquier tipo de requisito ya que es la forma de mantenerse en el mercado y de optar a un mayor rango de ofertas. Así pues, necesitan investigar nuevas técnicas que les permitan cumplir dichos códigos de red.

Algunos ejemplos de códigos de red severos se pueden ver a continuación (*Figura 6* y *Figura 7*) [9], como es el caso de Sudáfrica y de otros países (*Figura 8*):

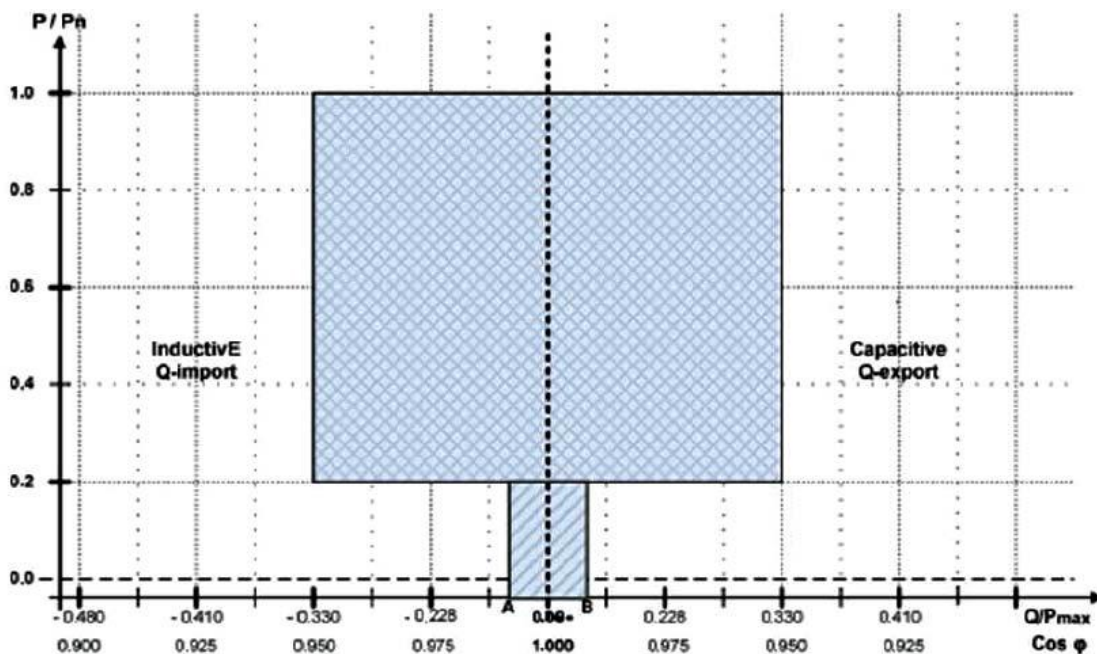


Figura 6: Potencia reactiva requerida para energía eólica en caso de hueco de tensión en Sudáfrica.

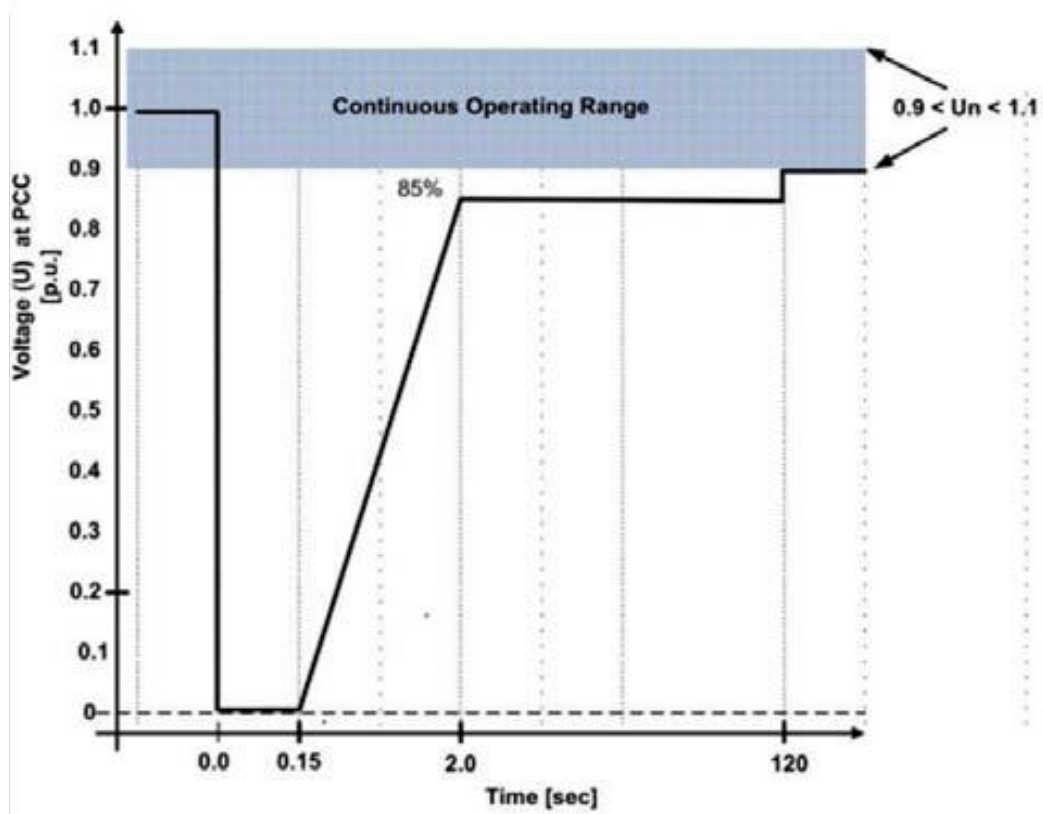


Figura 7: Código de red de Sudáfrica para huecos de tensión.

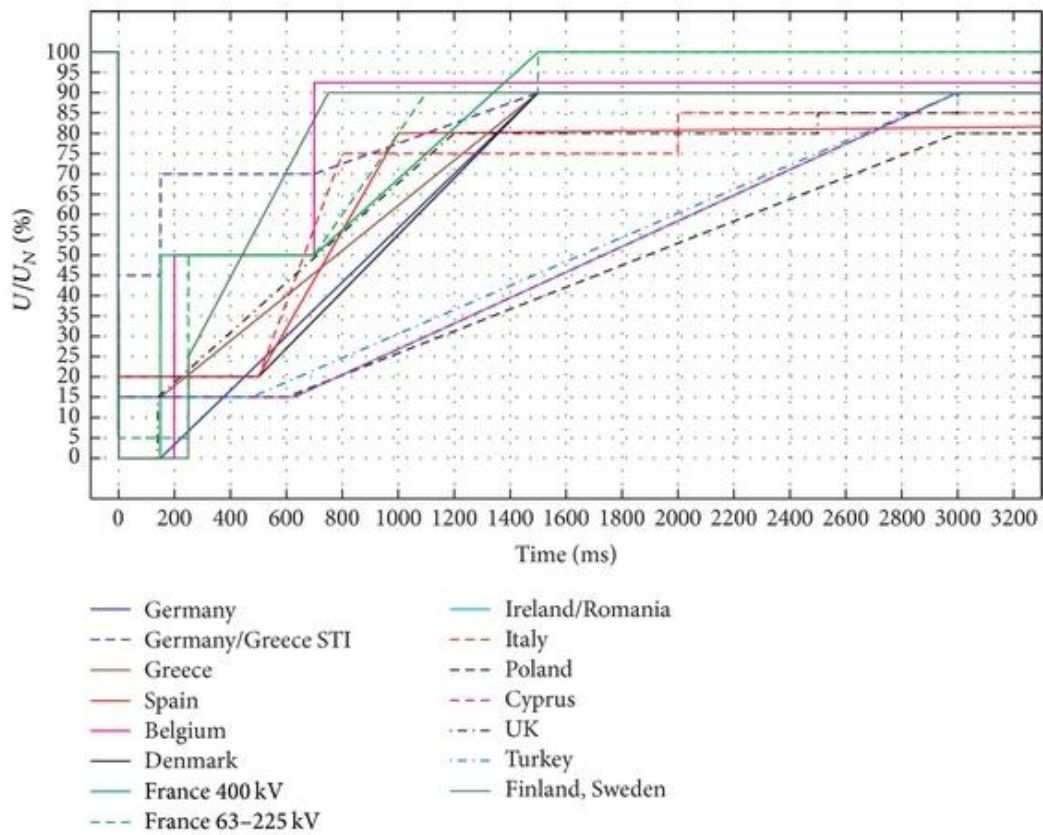


Figura 8: Códigos de red para huecos de tensión en distintos países.

1.4. Objetivo del proyecto

Tal y como se dice al principio de la introducción, las empresas que se dedican a este sector buscan disminuir al máximo el precio de la energía eólica para poder competir con otras técnicas de generación convencionales y renovables. Así pues, la lucha por la disminución del LCOE tiene como objetivo principal el imponer esta tecnología como la más rentable a la hora de generar electricidad, pero también ayuda a que cada compañía intente optimizar todos y cada uno de sus componentes, siendo más competitivas en el mercado. De esta forma y gracias a los años que los países desarrollados van por delante, tecnológicamente hablando, de países en desarrollo, se puede competir contra mercados emergentes y de menor coste como es el chino, que actualmente está en auge.

Por ello, el objetivo del presente proyecto es el de realizar un programa que permita dimensionar con mayor precisión la capacidad de bus del convertidor back-to-back que tiene conectado al rotor las máquinas asíncronas de los aerogeneradores.

Con este programa se pretende que de manera sencilla se pueda introducir distintos parámetros de máquinas que se utilizan como generador eólico y con su ejecución se obtenga el valor óptimo de la capacidad de bus ante huecos de tensión de determinada profundidad.

La capacidad de bus es un componente crítico en el sistema, y lo que se ha hecho hasta el momento es sobredimensionarlo para evitar errores. Es un componente crítico porque no se puede disminuir su capacidad aleatoriamente, ya que las variaciones de tensión que se producirían en el bus serían elevadas, es crítico también por el tamaño que tiene dentro del convertidor, y por su precio. Así pues, con un programa que optimice este componente se podrá ganar espacio dentro del convertidor y reducir el coste de dicha capacidad, por tanto, reducir el coste del convertidor.

Se debe tener en mente que el convertidor de un aerogenerador tiene una participación importante en el coste total del mismo, como indica la siguiente imagen (*Figura 9*), por lo que reduciendo el precio de sus componentes se conseguirá ser más competitivos:

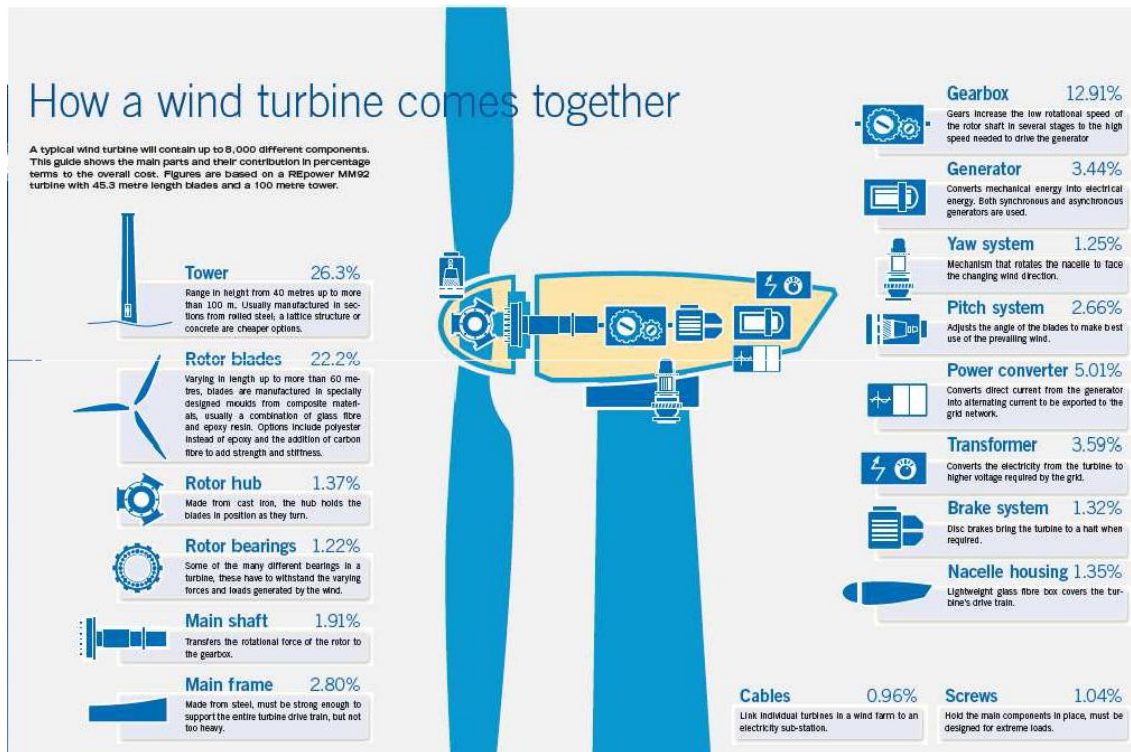


Figura 9: Porcentaje aproximado en los cuales se divide el coste total de un aerogenerador.

En este gráfico (Figura 9) se ve como el convertidor ronda el 5% del sistema completo y que es una de las partes más importantes en cuanto a precio. Dentro del convertidor, la capacidad cuesta entre el 10 y el 20% del precio del stack de potencia, según [3]. Por lo tanto, optimizar y reducir costes tendrá influencia directa en el coste final, pero no hay que olvidarse de las exigencias del componente.

La capacidad de bus óptima será aquella que junto a sus sistemas de protección aseguren que el convertidor no va a sufrir daños por sobretensión y que los aerogeneradores no tengan que pararse por salirse del funcionamiento adecuado que exigen los códigos de red.

2. DEPENDENCIA DE LA CAPACIDAD DE BUS

En la elaboración del proyecto, una de las primeras preguntas que surgen y por la cual se elabora una hoja de ruta es: ¿de qué depende la capacidad de bus? Para organizar las ideas y poder darles cabida, se analizará la capacidad de bus en las diferentes condiciones que trabaja.

Cabe destacar, que desde un primer momento se tiene claro que el parámetro que más va influir en el dimensionado de la capacidad de bus es la tensión de dicho bus y la necesidad de limitar sus variaciones.

2.1. Funcionamiento de la capacidad en permanente

Para comprender mejor los distintos factores que afectan al dimensionado de la capacidad de bus en régimen permanente, se analiza en primer lugar un artículo propiedad de la empresa Ingeteam [3].

Según este artículo [3], cuando trabajamos en régimen permanente las principales variables que se dimensionan son la corriente y la tensión que van a circular por la capacidad, en valores nominales y no en variaciones. También añaden, que el valor de la capacidad no tiene gran influencia en la corriente que circulará por el condensador.

El objetivo principal del proyecto es el de dimensionar la capacidad de bus del convertidor, por tanto, lo que este artículo refleja es importante a la hora de desechar el régimen permanente para el dimensionado. No obstante, y para corroborar lo que en el artículo se dice, en el presente proyecto se ha realizado mediciones en los modelos para observar los valores de corriente y tensión en la capacidad.

Lo primero que se realizó fue la comparación entre las ecuaciones teóricas y el modelo para ver si se obtenían en régimen permanente los mismos resultados. Las ecuaciones con las que se trabajó fueron las siguientes (Ecuación 2 y 3):

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + (L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s}) \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s (L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s}) i_{qr} \quad (2)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s}) \frac{di_{qr}}{dt} + s \omega_s (L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s}) i_{dr} + s \omega_s \frac{L_{sr} v_s}{\omega_s L_s} \quad (3)$$

Con estas ecuaciones se comparó el valor obtenido en teórico y en el modelo y se vio que los resultados eran similares. Una vez que esto se validó, se pasó al cálculo de la corriente y la tensión en el bus de continua (lo cual también se comprobó que era similar entre teoría y modelo), así como a la observación del rizado de estas variables.

Se hizo trabajar al modelo en régimen permanente, es decir, una vez que el flujo libre de la máquina, debido al arranque, había desaparecido. En ese instante, se analizaba la corriente y la tensión por la capacidad de bus viendo su rizado. Con esto se

observó que el rizado de tensión, debido a las corrientes que circulaban, era despreciable si se comparaba con las fluctuaciones de tensión que se producían en los transitorios.

Con estas validaciones concluimos, al igual que en el artículo de Ingeteam, que el trabajo de la capacidad en régimen permanente no establece su valor.

2.2. Funcionamiento de la capacidad en transitorios

Los principales transitorios que puede sufrir el convertidor de una MADA son producidos por un cambio brusco de potencia o por un cambio brusco en la tensión del estator. Dichos transitorios harán que la fluctuación de tensión en el bus sea muy importante, por lo que acarrearán consecuencias en el cálculo de la capacidad de bus.

Los cambios bruscos en la consigna de potencia son dependientes del control de la turbina, por lo que se podrán realizar actuaciones que los mitiguen. Los cambios bruscos en la tensión del estator (tensión de red) muchas veces son impredecibles, por tanto, serán estos en los que se centrará el proyecto.

Los cambios en la tensión de red son a su vez conocidos como huecos de tensión y pueden ser definidos como: una reducción brusca de tensión de red a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión nominal, con su posterior restablecimiento en un corto periodo de tiempo.

Dicha reducción brusca en la tensión de red puede ser que se produzca en una de las fases, en dos o en las tres. Dependiendo del número de fases afectadas se tiene un tipo de hueco u otro, y esto hará que las sobrecorrientes y sobretensiones inducidas en el rotor se rijan por un comportamiento o por otro.

Para entender las consecuencias de los distintos tipos de huecos, se ha realizado un periodo de documentación y aprendizaje: capítulo 6 [1] y capítulos 3, 4 y 5 [2].

2.3. Variables que afectan al dimensionado de la capacidad

Para dimensionar correctamente la capacidad de bus es necesario fijarse en el valor de tensión que alcanza el bus de continua, y es muy importante que el valor que se alcance no sea superior a ciertos límites, ya que si esto ocurriese, la máquina se desconectaría para evitar la rotura de componentes, acción que muchos códigos de red actualmente prohíben.

El valor de tensión que alcanza el bus de continua, dependerá de los huecos de tensión y de los parámetros de la máquina.

Dentro de los parámetros, hay algunos que varían de unas máquinas a otras con mayor frecuencia y en rangos conocidos, por lo que se estudiará que ocurre con los valores de la capacidad para distintos puntos de funcionamiento.

A su vez, como se ha estudiado, no todos los huecos tienen las mismas consecuencias, por lo que se estudiarán los tipos de huecos más dañinos y de esta forma poder obtener la capacidad de bus óptima para las condiciones más extremas.

Teniendo en cuenta lo anterior, estableceremos una serie de variables que podremos variar en la máquina y en los tipos de hueco para obtener las capacidades óptimas en cada caso:

- Tensión de red: se establecerá la tensión de la red en el instante del hueco. Dependerá de la normativa, pero el peor momento se dará cuanto mayor sea la diferencia de tensión entre el instante anterior y posterior al origen del hueco.
- Profundidad del hueco.
- Tipo de hueco.
- Tensión de rotor bloqueado.
- Inductancia de fugas.
- Deslizamiento (velocidad de giro).
- Frecuencia de conmutación (retardo en la actuación del chopper).
- Número de choppers.
- Parámetros de entrada y salida del chopper.
- Tensión máxima de bus admisible.

3. MODELADO Y PROGRAMA DE CÁLCULO EN MATLAB

3.1. Distintos m-files y su uso

En este primer apartado de cómo se ha realizado el programa se describe qué hay dentro de cada m-file y qué son las distintas cosas que el usuario puede modificar.

a) Inicio_codigo

En el primer m-file se hace la limpieza de todas las variables existentes en el workspace así como de la pantalla de Matlab. A continuación se tiene distintos apartados en los que se definirán valores necesarios para la ejecución del programa:

1. Primeros valores necesarios: se define el autor de la simulación, el modelo utilizado, como se guardarán las variables y los límites de tensión en el bus y de mínima capacidad de bus.
2. Aquí se establecen los valores (en vectores) de las distintas variables que compondrán el número de casos que tienen que ser ejecutados y para los que se calcula la capacidad de bus óptima. Hay 6 variables que pueden ser susceptibles a cambios:
 - Chopper: es el número de choppers que entrarán en funcionamiento cuando se produzca el hueco. En el modelo realizado este número podrá ir de 0 a 3, ambos incluidos y deberá ser un número entero. Si bien, no es muy interesante simular cuando no existe chopper, ya que la sobretensión será muy grande y por lo tanto, la capacidad que la solventará será a su vez grande.
 - Tension_red_remanente: es el valor por unidad que multiplicará a la tensión de red real una vez se ha producido el hueco de tensión. Es recomendable según últimas normativas que el rango de dicho valor esté entre 0 y 0.25.
 - Frecuencia_conmutación: es la frecuencia a la que trabajará nuestro convertidor, y es la que establece a su vez el retardo de actuación del chopper. El valor de esta frecuencia variará entre 1500 y 3000 Hz.
 - Inductancia: se establece el valor por unidad de la inductancia de fugas total. Dicho valor oscila entre 0.15 y 0.45 según datos de Ingeteam. Una vez establecido ese valor, internamente se calcula la inductancia de fugas del estator y del rotor dividiendo la inductancia de fugas total entre 2 (el valor de ambas inductancias de fugas en la realidad es similar).

- Deslizamiento: se establece el valor por unidad del deslizamiento yendo el rango de este entre -1 y 1. No obstante, es recomendable que el rango se encuentre en +/- 0.25.
 - Vbloqueo: tensión de rotor bloqueado de la máquina. Establecerá la relación de espiras entre rotor y estator. El rango de valores va entre 1600 y 2200 V.
3. Versión y punto de partida: se selecciona la versión de programa que se ejecutará y en el caso de ser la segunda, estableceremos el punto de partida. La segunda versión es la recomendada por rapidez y forma de cálculo, tal y como se verá posteriormente.
 4. Condiciones de la simulación: se establecen los dos parámetros que se posibilitan (modo de simulación y tiempo final de simulación).
 5. Chopper: se introducen los límites que gobiernan la histéresis del chopper y su valor nominal.
 6. Demandas de potencia: se establece el nivel de potencia activa y reactiva que impondrá nuestro control para un funcionamiento nominal del generador. En el instante que sature el convertidor o entre el chopper (debido al hueco), se abrirán los IGBTs y las demandas serán nulas.
 7. Parámetros de máquina: se selecciona cuál de las máquinas va a ser utilizada y por tanto, que parámetros se establecen. Existe la opción de elegir entre 2 máquinas, una la utilizada en las prácticas de la asignatura del Máster de Energías Renovables de la Upna y cuyos parámetros no son 100% reales y la otra una de las máquinas de Gamesa de la cual conocemos los parámetros. Esta segunda máquina es la recomendada por mayor cercanía con la realidad.
 8. Tiempo y tipo del hueco: Se determina el instante en el que se produce el hueco y también cómo se puede elegir el tipo de hueco. El instante en el que se produce el hueco tiene especial importancia en huecos bifásicos.

b) Inicio_codigo_con_datos

Este archivo permite iniciar el programa cargando los datos que previamente han sido calculados y guardados. Una vez cargados dichos datos se pasa a la GUI de dibujado. Además se establece una variable (no debe ser modificada) que ayuda a solventar problemas internos de selección de archivos en la GUI.

c) Parametros_G8X_V3_2

Los principales aspectos que se definen dentro de este m-file son los parámetros del generador que será utilizado. También se definen parámetros de los filtros que utiliza el modelo de Ingeteam para que en caso de querer usar dicho modelo no haya problemas.

Las variables que se utilizan dentro del archivo están descritas en él, por lo que en principio no debería haber dificultades para su utilización.

d) Parametros_practica_master

El archivo es exactamente igual al que se describe en los parámetros de la otra máquina, por lo que es suficiente con leer el apartado anterior.

e) Calculo_Cbus_V2

Es uno de los métodos de cálculo que se ha llevado a cabo, y hasta el momento, se puede decir que es el método que más rápido converge.

En el código del m-file se definen en primer lugar como comenzar la simulación en un punto cualquiera. A continuación se determinan algunos valores que se utilizan para ayuda de la simulación, después, se establece el valor que toma cada vector de los que se han definido al principio según el caso en el que nos encontremos.

Posteriormente se ejecuta la parte importante del programa en la que se simula el modelo de Simulink a través del m-file y se recogen los datos que se generan. En esta parte se utilizan los datos extraídos para recalcular la capacidad de bus. Dicha capacidad se calculará mediante rectas de aproximación a la curva “exponencial” que se genera si representamos tensión de bus máxima frente a la capacidad de bus. Consiste en ir almacenando iterativamente valores de capacidad de bus e ir guardando para formar las rectas de aproximación con los valores más cercanos por arriba y por abajo al límite de tensión.

Un punto destacable de este archivo es la conservación de la última capacidad de bus óptima calculada y dependiendo de cómo se modifiquen las variables para el siguiente caso, se utiliza como capacidad de partida o no. Esta utilización podría mejorarse una vez se tuviera todo el conjunto de datos, ya que se podría establecer con qué cambio de variable se modifica menos la capacidad óptima y así poder utilizar distintas capacidades de partida según el caso.

El valor de capacidad será el adecuado cuando la tensión máxima este dentro de los rangos de tolerancia respecto al límite establecido. Una vez se alcanza este valor se guarda en la matriz de resultados que luego será usada para dibujar. Previamente a la realización correcta del cálculo se han podido dar errores por exceso de iteraciones, por exceso de cercanía entre valores de capacidad,... Si alguno de estos casos sucede, hay una variable que cambiará de 0 a un valor mayor que este (senal_ayuda). Si esto ocurriese, con las matrices de ayuda que hay confeccionadas se podría saber cuál de los casos ha dado el error.

Finalmente, se guardan los resultados y se pasa a establecer cuánto tiempo ha tardado el programa en calcular todos los casos (esto es útil si se hacen todos los casos seguidos y sin interrupciones) y se da paso a la GUI que dibujará las gráficas tal y cómo desea el usuario.

f) Calculo_Cbus_V1

Este archivo nos describe el primer método de cálculo que se realizó. La diferencia con la versión 2 reside en la mayor simpleza a la hora de entender el código, lo cual tiene inconvenientes como la imposibilidad de inicializar en un punto intermedio, ya que siempre comienza desde el primer caso. La única variable que se tocará dependiendo del número de casos ya está especificada en el archivo y está referida a la forma de guardar.

Otra diferencia entre ambas versiones está en la utilización de la capacidad anterior como capacidad de partida para el siguiente caso (que este método tampoco tiene implementado). Esta diferencia es la que le hace aumentar el tiempo de cálculo, por lo que es más lento que la versión dos.

Finalmente se da paso a la GUI y al dibujado de los datos que hemos calculado.

g) Calculo_Cbus_V3

Este archivo nos describe el tercer método. La diferencia frente a las otras versiones reside en el método de cálculo y en la forma de utilizar la máxima capacidad del equipo mediante la paralelización de los núcleos. Este camino estaría por explotar y podría ser una de las principales fuentes de agilización del programa, tal y como se describe en las líneas futuras.

Al utilizar la paralelización de los núcleos, queda desactivada la opción de comenzar con una capacidad de bus calculada previamente, ya que uno de los requisitos es la independencia de las iteraciones. En esta versión tampoco se puede empezar de un punto intermedio y el modo de ejecución de Simulink siempre será el Normal (tal y como está programado el código), motivo por el cuál su cálculo es algo más lento. No obstante, si se tiene un ordenador con mayor número de núcleos (con el que se ha realizado el proyecto posee 2) habría que ver que es más rápido.

Una vez se realiza el cálculo, la forma de guardar las variables es igual que en los otros casos.

Finalmente se da paso a la GUI y al dibujado de los datos que hemos calculado.

h) Codigo_gui

En este archivo se ejecuta una interfaz gráfica que facilita al usuario la forma de dibujar las gráficas según las distintas variables que ha modificado para el cálculo de la capacidad óptima de bus.

La parte más destacada del código se encuentra en conseguir que las variables no puedan estar en más de un campo al mismo tiempo y en coger los valores que el usuario ha establecido para cada una de esas variables.

Este código es el encargado de definir todas las opciones y detalles de la interfaz gráfica (botones, listas de valores, textos,...).

i) Dibujado_Cbus

Una vez que el usuario ha definido como quiere las gráficas que sacará el programa este m-file se encarga de ver en qué campo se encuentra cada variable y de desplazarse por la matriz de resultados cogiendo los valores deseados.

Aquí reside uno de los limitantes del programa y es el número de colores que se pueden emplear por gráfica (7). Al tener sólo siete colores distintos se ha hecho que cada variable pueda tener en el vector que la define como máximo siete valores.

Con este archivo finalizaría el programa a no ser que el usuario quisiera ver los parámetros más destacables que ha introducido en una hoja o quisiera solucionar los errores que hayan podido ocurrir en la simulación (si no se han resuelto previamente).

j) informacion_graficas

A este apartado se accede pulsando en el botón de la GUI que nos dice “+ info”. Ese botón hará que se despliegue una ventana con los parámetros más importantes de la simulación: variables, características del generador, de la red, del chopper,...

k) Solucion_errores

Una vez que hemos realizado todas las simulaciones aparecerá en la pantalla de dibujo el número de casos que no se han resuelto correctamente. Si se quiere visualizar uno a uno la resolución de los casos conflictivos partiendo de la capacidad de bus de referencia se debe teclear en el workspace el nombre del m-file: Solucion_errores.

Una vez comenzado el proceso se irán viendo los distintos valores de capacidad y su respuesta en tensión máxima en el bus de continua hasta alcanzar un valor deseado. Para que este viaje si tenga solución se han ampliado los rangos de tensión para cumplirse la aproximación y el valor del número máximo de iteraciones.

La aproximación se cumplirá cuando la diferencia entre el valor de capacidad que da la tensión máxima por debajo de la límite y el que la por encima están separados por menos de 10 microfaradios. Se debe cumplir también que la diferencia entre tensiones no sea superior a 100 V.

Una vez este fichero a resuelto todos los casos posibles de los que han fallado, se creará un nuevo archivo .mat en el que se recogen todos los resultados (los válidos hasta el momento más los que se generan válidos de este m-file).

Finalmente se volverá a la pantalla de dibujado con todos los casos que ha sido posible resolver correctamente.

3.2. Modos de ejecución y requisitos

El programa tiene dos modos de utilización que pueden ser independientes el uno del otro. Por un lado, existe la posibilidad de ejecutar todo el programa completo, es decir, desde el cálculo de las distintas capacidades óptimas hasta su dibujado.

Por otro lado, se puede ejecutar el programa cuando ya se dispone de una serie de datos previamente calculados para que solamente los dibuje. Haciendo esta diferenciación ya se puede establecer los distintos m-files que se han creado con su orden y su forma de ejecutar según lo que deseemos.

3.2.1. Ejecución del programa al completo

Una vez que se ha decidido ejecutar el programa al completo, es decir, que se establecen los parámetros de una máquina determinada, que se desea obtener los valores de las distintas capacidades óptimas según el cambio de las variables y su posterior dibujado, se debe establecer por cuál de los 3 métodos o versiones se quiere hacer el cálculo. Antes de la decisión se dan algunos datos comparando la primera y la segunda versión para distintos modelos (modelo de Ingeteam G8X_V3_2 y modelo simplificado con control discreto) que se han utilizado durante el proyecto (*Tabla 1* y *Tabla 2*).

La tercera versión no ha podido ser contrastada por falta de cumplimiento de los requisitos que esta versión necesita. No obstante si se pudo comprobar que funcionaba en un modelo anterior y trabajando en otro ordenador.

DATOS COMUNES			
Nº de casos	192		
Modelo utilizado	G8X_V3_2		
Control	Ingeteam		
DATOS DE LA SIMULACIÓN			
Versión	1	2	2
Modo de simulación	Accelerator	Normal	Accelerator
Iteraciones	1182	736	722
Horas	5	5	4
Minutos	24	44	15
Segundos	45	50	39
Tiempo total (s)	19485	20690	15339
Iteraciones medias por caso	6,15625	3,8333333	3,7604167
Tiempo medio por caso (s)	101,48438	107,76042	79,890625

Tabla 1: Datos obtenidos de la simulación en el modelo de Ingeteam para la versión 1 y 2.

DATOS COMUNES				
Nº de casos	15			
Modelo utilizado	sistema_Mada_practica_master_control_s			
Control	Ingeteam			
DATOS DE LA SIMULACIÓN				
Versión	1	2	2	2
Modo de simulación	Accelerator	Normal	Accelerator	Rapid Accelerator
Iteraciones	114	50	50	51
Horas				
Minutos	30	32	16	16
Segundos	26,5	2,6	14	13,6
Tiempo total (s)	1826,5	1922,6	974	973,6
Iteraciones medias por caso	7,6	3,333333333	3,333333333	3,4
Tiempo medio por caso (s)	121,7666667	128,1733333	64,93333333	64,90666667

Tabla 2: Datos obtenidos de la simulación en el modelo sistema_Mada_control_s para la versión 1 y 2.

Los requisitos necesarios para la ejecución de cualquiera de las versiones y del modelo realizado en el proyecto (sistema_Mada_control_s), son la disponibilidad de Matlab 2010 o inferior, que nuestro ordenador sea de 32 bits o disponga de un compilador para el archivo programado en C. Matlab 2010 es necesario porque el modelo de la máquina no es como el que está en la librería de Matlab y debido a esto, en versiones más actuales de Matlab existe un problema de destrucción de esta máscara modificada cada vez que se apaga el ordenador. La versión de 32 bits o la necesidad de un compilador es por el hecho de tener el control programado en C y la necesidad de crear un archivo .mex32 (el cual ya lo tenemos creado) o .mex64 (que se debería crear) antes de su ejecución.

Además de estos requisitos, la versión tres, necesita otro más: que Matlab tenga instalada la toolbox Parallel Computing. Esta toolbox es necesaria para implementar la función parfor y matlabpool, que son las encargadas de la paralelización de los núcleos, es decir, de distribuir los distintos casos entre los núcleos del ordenador.

a) Calculo_Cbus_V2

En este caso, el cálculo de la capacidad de bus se podrá comenzar en un punto cualquiera. Lo que esto significa es, que si la simulación ha sido detenida voluntaria o accidentalmente y se quiere reanudar su marcha, se debe establecer el punto en el cual se ha detenido y se podrá continuar con los cálculos. De esta forma, la matriz de resultados final será rellenada correctamente (sin dejar posiciones a cero) para su posterior dibujado.

A esta forma de cálculo se le puede implementar la herramienta de Simulink Accelerator Mode o Rapid Accelerator Mode (dependiendo del modelo de Simulink, pero válido para el del proyecto) y una memorización de la última capacidad de bus calculada, cosa que hace que sea el método de cálculo más rápido de los tres. La rapidez de cálculo de cada caso dependerá también de la rapidez del ordenador utilizado.

Se entiende por caso: todas y cada una de las simulaciones que se realizan con todos los parámetros fijados excepto la capacidad de bus, este valor irá variando para que se cumpla la condición de tensión máxima de bus que se produce con el hueco de tensión. Cada vez que la capacidad de bus se ve modificada (sin cambiar nada más) se cuenta una iteración.

Para el correcto funcionamiento de este modo los m-files que se deben ejecutar son los siguientes y en el siguiente orden:

- Inicio_codigo
- Parametros_G8X_V3_2 (si se eligen los parámetros de esta máquina) o Parametros_practica_master (si se eligen estos otros)
- Calculo_Cbus_V2
- Codigo_gui
- Solucion_errores
- Dibujado_Cbus
- Informacion_graficas

Los tres últimos m-files pueden ser ejecutados en este orden o en otro, todo depende de lo que desea el usuario.

b) Calculo_Cbus_V1

Si es este el m-file elegido, el cálculo de los casos totales irá del primero al último, sin posibilidad de reanudar alguna simulación detenida previamente. Así pues, este método es aconsejable si el número de casos no es muy grande o si disponemos de seguridad de no interrumpibilidad del proceso.

Esta forma de cálculo tiene implementada la herramienta de Simulink Accelerator Mode o Rapid Accelerator Mode. La diferencia con el caso anterior además de no poder comenzar de cualquier punto es que no se queda guardada la capacidad de bus del caso anterior y se ralentiza algo el cálculo.

Para el correcto funcionamiento de este modo los m-files que se deben ejecutar son los siguientes y en el siguiente orden:

- Inicio_codigo
- Parametros_G8X_V3_2 (si se eligen los parámetros de esta máquina) o Parametros_practica_master (si se eligen estos otros)
- Calculo_Cbus_V1
- Codigo_gui
- Solucion_errores
- Dibujado_Cbus
- Informacion_graficas

Los tres últimos m-files pueden ser ejecutados en este orden o en otro, todo depende de lo que desea el usuario.

c) Calculo_Cbus_V3

En este m-file está implementada una toolbox de Matlab llamada Parallel Computing toolbox y sin la cual no es posible su correcto funcionamiento. Esta toolbox se encarga de que los distintos núcleos del ordenador trabajen con el mismo fichero de Matlab, y por lo tanto, ser capaces de distribuir los distintos casos en dichos núcleos. La ventaja que tiene este procedimiento es que se pueden calcular varios casos al mismo tiempo. Sin embargo, tal y como se ha realizado la implementación de esta herramienta, sólo somos capaces de trabajar en Normal Mode de Simulink, lo cual hace que no haya prácticamente diferencia entre trabajar en un solo núcleo con Accelerator Mode y esto. Si bien destacar que la comparación se realiza en un ordenador de dos núcleos e implementando el Accelerator Mode en vez del Rapid Accelerator Mode. Si se aumenta el número de núcleos o se cambia la configuración al Rapid Accelerator Mode se deberá hacer la comparación de nuevo.

Una mejora sustancial de esta versión sería incorporar el Rapid Accelerator Mode porque se podría calcular con la misma velocidad que en el primero de los métodos de cálculo (Calculo_Cbus_V2) pero a su vez, varios casos en paralelo, por lo que haría de esto el mejor de los métodos. Otra ventaja de este método es que no es necesario más que una única licencia de Matlab para su funcionamiento, mientras que si se quiere paralelizar casos en distintos ordenadores se necesitan el mismo número de licencias como de ordenadores se disponga.

La paralelización ha sido aplicada al segundo método de cálculo (Calculo_Cbus_V1), el cual no puede ser inicializado en cualquier punto, pero podría ser aplicada de la misma manera al método uno (Calculo_Cbus_V2), sin olvidar que pasaríamos a trabajar en Normal Mode. Si se aplica este sistema al caso uno (Calculo_Cbus_V2), no se podrían inicializar los casos con valores de capacidad de bus previos, ya que lo más importante en la utilización de esta herramienta es la independencia de los casos. Este requisito que de primeras parece fácil de realizar da bastantes problemas a la hora de intentar llevarlo a cabo. Otro requisito sería el de trabajar con variables de tipo estructura.

Para el correcto funcionamiento de este modo los m-files que se deben ejecutar son los siguientes y en el siguiente orden:

- Inicio_codigo
- Parametros_G8X_V3_2 (si se eligen los parámetros de esta máquina) o Parametros_practica_master (si se eligen estos otros)
- Calculo_Cbus_V3
- Codigo_gui
- Solucion_errores
- Dibujado_Cbus
- Informacion_graficas

Los tres últimos m-files pueden ser ejecutados en este orden o en otro, todo depende de lo que desea el usuario.

3.2.2. Ejecución del programa para dibujar datos

Este modo de ejecución se realizará siempre y cuando previamente ya se haya calculado y guardado la matriz de resultados. Con este modo de ejecución se visualizarán esos datos calculados de forma rápida.

Para llevar a cabo este programa se ejecutarán los siguientes archivos:

- Inicio_codigo_con_datos
- Código_gui
- Solucion_errores
- Dibujado_Cbus
- Informacion_graficas

3.3. Modelo de prácticas del Máster de EE.RR. con control en C (Simulink)

El modelo de Simulink utilizado es un análogo al de PSIM realizado en las prácticas de eólica del Máster de Energías Renovables de la Upna. No obstante, tiene dos principales diferencias: el generador de red y huecos y el control de inversor programado en C.

Dentro del modelo se pueden diferenciar distintas partes que lo componen y que es interesante conocer:

a) Modelización de la red y generador de huecos.

Se dispone de un bloque en el cual se genera la red trifásica y equilibrada deseada, y a su vez es donde se introduce el instante y el tipo de hueco.

La red eléctrica que se genera es una red trifásica y equilibrada, por lo que se comporta como una fuente ideal.

Este bloque incorpora una rampa de introducción de la tensión, muy útil para evitar las sobrecorrientes que se producen si introducimos un escalón tan importante en las tensiones del estator y además tenemos la máquina sin magnetizar. Con esta característica se consigue que la tensión inicial sea nula y en cuestión de 0.1 segundos se alcance el valor de tensiones deseado, haciendo que el transitorio sea progresivo.

Los valores que se pueden introducir hasta ahora son la tensión de la red y la longitud de la rampa de inicio. En el interior de este bloque también se cogerá el valor de la frecuencia (freq). La tensión de la red es aconsejable coger como el 10% superior a la tensión nominal, ya que las normativas permiten estos valores y si se produce un hueco será el caso más desfavorable.

También se define en este bloque el instante en el que se producirá el hueco, su profundidad y el tipo de hueco.

La profundidad será una variable determinada por un valor que puede ir entre 0 y 1 (queda definida con el vector `Tension_red_remanente` que se establece en el primer m-file). El tipo de hueco será también elegido en el primer m-file y la elección podrá ser entre no tener hueco, hueco monofásico, hueco bifásico a tierra, hueco bifásico entre fases y hueco trifásico. Finalmente se define el instante que comienza el hueco y el instante en el que finaliza. Este programa está pensado para analizar el comportamiento de la máquina ante la entrada del hueco, por lo que el instante de salida no tiene mucha importancia.

Para optimizar la capacidad de bus, se especifica en la introducción, que se desea estudiar el peor de los casos, por tanto, el hueco deberá ser bifásico entre fases y el instante que se produzca no deberá producir discontinuidades entre las tensiones de las fases. Esto hará que el flujo libre que se induce sea máximo y por lo tanto será el peor hueco al que se pueda enfrentar la máquina.

b) Máquina asíncrona utilizada

La máquina que se utiliza tiene la misma máscara que la genérica de Matlab, pero ha sido modificada por la empresa Ingeteam. Las modificaciones han hecho que el terminal donde se introduce la velocidad o el par sea independiente de la entrada (parece estar anulado). Otra particularidad de esta máquina es el funcionamiento discreto que tiene programado, así pues, se le debe introducir el tiempo de discretización (T_{discr}).

El hecho de que la máquina no sea la genérica de Matlab hace que no se pueda utilizar una versión de Matlab superior a la 2010, ya que las versiones posteriores no mantienen los cambios realizados en las máscaras una vez reiniciamos el ordenador.

c) Convertidor de lado de máquina y protecciones mediante choppers

En este modelo solo está implementado el inversor del lado de máquina y por tanto, solo tenemos su control. Para la implementación del inversor tenemos IGBTs y diodos basados en un control digital.

El control del inversor ha sido realizado mediante una S-function de Simulink que sirve para incorporar la programación en C realizada. Destacar que el control es discreto y se ejecuta una vez cada tiempo de discretización (T_{discr}). El tiempo de discretización debería estar relacionado con la frecuencia de conmutación, tal y como lo está el retardo del chopper, sin embargo, no lo se hace así porque el retardo no se considera importante para el control de las tensiones de referencia. Al funcionar con un tiempo de discretización mucho menor al retardo que debería ser realmente, se evitan problemas de seguimiento del control y se soluciona el problema del bucle algebraico que plantea Matlab si no disponemos de algún retardo.

Para mantener la tensión deseada en el bus, tarea de la que se encarga el convertidor del lado de red (rectificador) se ha puesto una fuente de tensión que se desconecta cuando se produce el hueco. Así pues, mientras el funcionamiento es normal la tensión en el bus es constante, pero cuando se produce el hueco esta fuente se desconecta y el condensador ve la tensión correspondiente a la energía que sale del rotor.

Como dicha energía hace que la tensión del bus crezca mucho se deben poner protecciones para evitar la destrucción de los transistores. La forma de disipar parte de la energía que llega al bus es mediante la incorporación de uno o varios choppers. Un chopper es una resistencia en paralelo con la capacidad de bus por la que circula corriente cuando la tensión del bus supera un cierto límite y deja de quemar energía cuando cae por debajo de otro límite (funcionamiento en histéresis). Dependiendo del número de choppers la tensión caerá antes o más tarde. El tiempo que tarda en caer la tensión también depende del retraso de la entrada del chopper, que depende a su vez de la frecuencia de conmutación.

En nuestro caso tenemos implementado 3 choppers, pero al tratarse de una de las variables que se pueden modificar según el caso, podemos hacer que los que actúen sean 0, 1, 2 o 3.

d) Lazo de control y generación de señales de disparo de IGBTs

Las consignas que se incorporan serán potencias de referencia (activa y reactiva) e implementaremos un control PI digital en ejes d-q para obtener unas consignas de tensión.

La digitalización se ha realizado mediante una programación del controlador en C. Lo primero que se hace es obtener unas consignas de corriente en ejes d-q a partir de las consignas de potencia. Dichas corrientes serán limitadas hasta el valor que pueden soportar los componentes y mediante la actuación del control PI se obtendrán unas tensiones en los mismos ejes. Una vez que se tienen las tensiones se les aplica un control Antiwindup y la inyección del tercer armónico. Con todo ello ya se tiene las tensiones de consigna del PI y por tanto realizando una modulación PWM se consiguen las órdenes de disparos para los IGBTs.

En la programación del PI se incorpora también las órdenes de entrada y salida del chopper. Además, si se activa el chopper o si satura el convertidor, se generará una señal auxiliar que hará que nuestras consignas mientras una de estas dos cosas ocurre sean nulas y también hará que los IGBTs se abran.

En el cálculo e implementación del controlador PI se ha tenido en cuenta la variación de algunos parámetros de la máquina que pueden afectarles:

- Tensión de rotor bloqueado
- Inductancia de fugas de rotor y estator (referenciado a estator)
- Inductancia mutua (referenciado a estator)
- Resistencia rotórica (referenciado a estator)
- Tiempo de hueco
- Retardo (dependiente de la frecuencia de conmutación)
- Límites de la histéresis del chopper.

e) Cálculo de flujos y tensiones inducidas

Con las corrientes y tensiones en los ejes d-q y alfa-beta tanto del rotor como del estator se calculará matemáticamente los flujos que se inducen. Se calculará el flujo libre, el forzado y el total como herramienta didáctica. Este cálculo servirá para observar que ocurre en el momento del hueco y para comprobar cuál de los tipos de huecos es el más desfavorable (se podrá comprobar que el más severo es el bifásico entre fases).

f) PI analógico

Se mantendrá una serie de bloques que servirán para observar la diferencia entre el modelo digital del controlador y el modelo analógico. Será simplemente algo didáctico y sin utilidad, por lo que podrá ser borrado para mayor claridad en caso de continuar con este modelo.

3.4. Variables que se introducen al modelo de Simulink

En esta parte del proyecto se definirán las variables que son necesarias para poder ejecutar el modelo de Simulink, independientemente de utilizar el conjunto de m-files diseñados o no:

- Chopper1: indica si el primer chopper está habilitado o no;
- Chopper2: indica si el segundo chopper está habilitado o no;
- Chopper3: indica si el tercer chopper está habilitado o no;
- prof: profundidad del hueco.
- Retardo: tiempo muerto entre cálculos internos que depende de forma inversamente proporcional de dos veces la frecuencia de conmutación.
- Freq_conm: frecuencia de conmutación de la PWM.
- Ls: inductancia del estator.
- Lls: inductancia de fugas del estator.
- Lr: inductancia del rotor (referida al estator).
- Lplr: inductancia de fugas del rotor (referida al estator).
- Lm: inductancia mutua (referida al estator).
- wm: velocidad de giro de la máquina.
- s: deslizamiento de la máquina (en tanto por cien).
- Ns_Nr: relación de espiras entre primario y secundario.
- Kav: inversa de la relación de espiras.
- Sn: potencia nominal de la máquina.
- Un: tensión nominal de la red.
- Rs: resistencia estática.
- Rpr: resistencia rotórica (referida al estator).
- pp: pares de polos de la máquina.
- J: inercia.
- Vred: tensión real de la red.

- freq: frecuencia de la red.
- fs: frecuencia nominal de la red.
- Ps: consigna de potencia activa (negativa si se quiere sacar energía por estator).
- Qs: consigna de potencia reactiva (negativa si se quiere sacar energía por el estator).
- Id_r_ref: consigna de corriente calculada según Qs.
- Iq_r_ref: consigna de corriente calculada según Ps.
- Thueco: tiempo en el que se produce el hueco.
- Tipo_hueco: define si se trata de un hueco monofásico, bifásico a tierra, bifásico entre fases, trifásico o si no hay hueco.
- Kp: constante proporcional del controlador analógico.
- Ki: constante integral del controlador analógico.
- Vbus_superior: tensión en la que entra a actuar el chopper.
- Vbus_inferior: tensión a la que deja de actuar el chopper.
- Vbus_limite: tensión máxima que puede alcanzar el bus de continua.
- Vbus_ref: tensión nominal del bus de continua.
- Tdiscr: tiempo de discretización.
- C_bus: capacidad inicial del condensador de bus.
- Rchopper: valor de la resistencia de chopper.

3.5. Variables necesarias para el funcionamiento de cualquier m-file

- senal_ayuda: indica la cantidad de errores, aproximaciones o exceso de iteraciones se han producido en el número de casos simulado. Es deseado que el número de errores sea cero, las aproximaciones no importa (no son errores como tal) y el exceso de iteraciones sea pequeño o cero a poder ser.
- exceso_iteraciones: indica el número de casos que han excedido el número de iteraciones y por lo tanto, tienen el valor de la capacidad óptima en cero.
- Maquina: indica el nombre de los parámetros de máquina cargados.
- Nombre_autor: indica el nombre del que ha ejecutado el programa.
- Fecha_datos: indica el día en el que se ha comenzado con la simulación.
- Nombre_modelo: nos da el nombre del modelo de Simulink que se ha utilizado.
- Nombre_datos_escogidos: es el nombre con el que se guardarán los distintos archivos .mat.
- Minima: matriz que almacena los casos que no se han resuelto correctamente por no dejar el programa disminuir más su capacidad. Los almacena en la posición adecuada para poder saber en qué condiciones ha sucedido. Si no hubiese ningún caso que cumpla esta condición, la matriz será de todo ceros.
- Iteraciones: matriz que almacena el número de iteraciones que se realizan para resolver cada caso. Los almacena en la posición adecuada para poder saber en qué condiciones ha sucedido.

- Error: matriz que almacena el número de errores que ocurren en la resolución de los casos. Los almacena en la posición adecuada para poder saber en qué condiciones ha sucedido. Si no hubiese ningún caso que cumpla esta condición, la matriz será de todo ceros.
- error: da el número de errores que han ocurrido, independientemente del caso en el que se hayan producido.
- Aproximacion: matriz que almacena el número de aproximaciones que se han producido. Las aproximaciones se dan cuando la tensión máxima no está dentro del rango deseado, pero los valores de capacidad entre los que se encontraría este valor están más próximos que 10 microfaradios y la tensión máxima entre ellos es menor de 50 Voltios. Si no hubiese ningún caso que cumpla esta condición, la matriz será de todo ceros.
- aproximación: da el número de aproximaciones que han ocurrido, independientemente del caso en el que se hayan producido.
- Valor_Cbus: matriz que almacena los valores óptimos de la capacidad de bus para cada caso. Los almacena en la posición adecuada para poder saber en qué condiciones ha sucedido.
- Vbus_ref: valor de tensión de bus de referencia, utilizado para la primera iteración de cada caso.
- Vbus_limite: valor máximo que puede alcanzar la tensión de bus.
- Vbus_inferior: valor inferior de la histéresis que define la actuación del chopper.
- Vbus_superior: valor superior de la histéresis que define la actuación del chopper.
- Qs: demanda de potencia reactiva por parte del control. Será nula en caso de actuar el chopper o saturar el convertidor (negativa si se quiere sacar energía por estator).
- Ps: demanda de potencia activa por parte del control. Será nula en caso de actuar el chopper o saturar el convertidor (negativa si se quiere sacar energía por estator).
- freq: frecuencia de la red.
- Vred: tensión real de la red.
- Tdiscr: tiempo de discretización.
- J: inercia.
- pp: pares de polos de la máquina.
- Lm: inductancia mutua (referida al estator).
- Rpr: resistencia rotórica (referida al estator).
- Rs: resistencia estática.
- Un: tensión nominal de la red.
- Sn: potencia nominal de la máquina.
- Ns_Nr: relación de espiras entre primario y secundario.
- Vbloqueo: vector que define los distintos valores que se asignarán a la tensión de rotor bloqueado y por lo tanto, que definen la relación de espiras.
- Wm: velocidad de giro de la máquina.
- Deslizamiento

- Lls: inductancia de fugas del estator.
- Lplr: inductancia del rotor (referida al estator).
- Inductancia: vector que define los distintos valores que se darán a las inductancias de fugas de rotor y estator.
- Frecuencia_conmutacion: vector que define los distintos valores que adquirirá esta variable.
- Tension_red_remanente: vector que define los distintos valores de profundidad que tendrá cada hueco.
- Chopper: vector que define el número de choppers que actuará en cada caso.
- ws: valor equivalente a $2 \cdot \pi \cdot fs$.
- C_bus_min: capacidad de bus mínima inicial.
- C_bus_min2: capacidad de bus mínima (secundaria) si se necesita una inferior a la inicial.
- C_bus_min3: capacidad de bus mínima (tercera y última) si se necesita una inferior a las dos primeras.
- fs: frecuencia nominal de la red.
- Id_r_ref: consigna de corriente calculada según Qs.
- Iq_r_ref: consigna de corriente calculada según Ps.
- Thueco: tiempo en el que se produce el hueco.
- Tipo_hueco: define si se trata de un hueco monofásico, bifásico a tierra, bifásico entre fases, trifásico o si no hay hueco.
- Rchopper: valor de la resistencia de chopper.
- Kp: constante proporcional del controlador analógico.
- Ki: constante integral del controlador analógico.
- C_bus_min_aux: variable de ayuda para establecer la capacidad mínima a la inicial al final de cada caso.
- cargado: variable que nos dice en que momento del programa se ha cargado un archivo previamente calculado, en caso de no haber carga será nula.
- C_bus_ref: variable de ayuda para establecer la capacidad de partida.
- tolerancia: rango de tensión alrededor de la tensión de bus límite (por encima y por debajo) que permite la aceptación de la capacidad de bus óptima.

4. MANUAL DE USUARIO

4.1. Introducción

A continuación se realizará una breve descripción del programa y sus posibilidades de uso. El programa que se ha realizado es un método de cálculo de la capacidad óptima de bus para cada uno de los casos simulados.

Los casos simulados tienen en común que los parámetros principales de la máquina no varían, sin embargo, si existe variación en algunas variables de la máquina, como por ejemplo la profundidad del hueco, el número de choppers, la frecuencia de conmutación, el deslizamiento, la inductancia de fugas y/o la tensión de rotor bloqueado.

Destacar que el programa ha sido planteado para la elección entre dos máquinas (distintos parámetros) y un modelo de Simulink (sistema_Mada_control_s), no obstante, este manual se centrará en los parámetros de máquina que tiene más cercanía con la realidad y en el modelo hecho para este proyecto. Si se quiere realizar simulaciones con otros modelos o con los otros parámetros se deberá hacer entendiendo los pasos que se dan en este manual.

Cuando se quiere utilizar este programa lo primero de todo hay que diferenciar entre dos formas de uso.

Por un lado existe la posibilidad de la utilización completa del programa, es decir, desde el cálculo de las capacidades óptimas de bus hasta ser dibujadas en las distintas gráficas que el usuario considere.

Por otro lado, se puede utilizar el programa como simple herramienta de dibujo, cuando por ejemplo, se tiene una montaña de resultados y se quiere ver el valor de la capacidad en unas condiciones determinadas.

4.2. Cálculo y dibujo de las capacidades

Lo primero que se debe saber antes de iniciar el programa es que existen un total de once archivos m-file, de los cuales varios de ellos son utilizados simplemente para la ejecución del programa, por lo tanto, no deben ser modificados, y otros que se descartan al elegir una u otra versión y una u otra máquina. Este manual se centra, como es lógico, en aquellos que deben ser modificados, ya que son los que debe entender el usuario para luego poder analizar otros casos.

Los programas que se descartan al elegir una u otra máquina y una u otra versión son muy similares entre sí, y entendiendo uno de cada el resto son parecidos.

4.2.1. “Inicio código”

Para comenzar, se debe abrir el archivo “Inicio_codigo” que es donde se inicializan la mayoría de los valores. Este archivo está dividido en distintos apartados según el campo de las variables que se pueden modificar. Estos campos y variables están bastante definidos en los propios m-files pero no obstante se detallan a continuación:

- Primeros valores necesarios: se establecen las variables que definen el autor, el modelo de Simulink con el que se va a trabajar (este manual se describe con el modelo “sistema_Mada_control_S”), el nombre con el que se van a guardar los datos (es interesante que sea acorde con el tipo de hueco que se produce) y valores de tolerancia, tensión de bus límite y capacidad de bus mínima.
- Vectores de variables: este apartado se denomina así porque en él se establecerán las variables que pueden ir cambiando de valor, y que por lo tanto confeccionarán el número de casos que se simulará a posteriori. Cada variable puede adquirir un número limitado de valores (7 como máximo) y además éstos deben estar dentro de un rango que depende de la variable (los rangos que se dan tienen los extremos incluidos en la posible asignación). Así pues:
 - Chopper: esta variable indicará el número de choppers que se incluyen, por lo tanto, adquirirá un número entero que vaya del 0 al 3 (ambos incluidos). Por ejemplo: [0 2 3]; Esto indicaría que en los sucesivos casos hay momentos de cálculo en los que no haya chopper, otros en los que haya 2 y otros en los que haya 3. Si bien, el caso donde no haya chopper no es muy interesante, ya que se trata del sistema de protección que utiliza nuestra máquina (crowbarless) ante huecos de tensión.
 - Tension_red_remanente: es el voltaje que quedará en la red cuando se produzca el hueco, normalmente se mide también en profundidad de hueco, que sería el resultado de restarle la cantidad que aquí se especifica a la unidad. El rango de valores para este caso va desde 0 (hueco total) hasta 0.25. Por ejemplo: [0 0.1 0.2 0.25]; Es importante recordar que la máxima longitud del vector puede ser 7.
 - Frecuencia_conmutacion: define el tiempo que tardan en conmutar los transistores y también el tiempo de retardo ($\text{Retardo} = 1/(2 * \text{Freq_conm})$) del chopper. El rango de valores va desde 1500 Hz hasta 3000 Hz. Por ejemplo: [1500 2000 2500 3000];

- Inductancia: establece la inductancia de fugas total. La inductancia de fugas del rotor y del estator se calculará dividiendo esta inductancia de fugas total por dos. El rango de valores es desde 0.15 hasta 0.45 (estos valores son por unidad).
Por ejemplo: [0.15 0.3 0.45]; Para la ejecución del programa estos valores serán calculados en Henrios internamente.
- Deslizamiento: determina la velocidad de giro de la máquina. El rango puede ir desde -0.25 hasta 0.25 en valores por unidad.
- Vbloqueo: es el voltaje de rotor bloqueado de la máquina, y determina la relación de vueltas entre estator y rotor. Esta tensión puede ir desde 1600 hasta 2200 V.
- Versión y punto de partida: en el programa se han realizado distintos métodos de cálculo intentando agilizar las simulaciones, ya que este es el punto más lento. Por lo tanto, el usuario puede decidir de qué manera quiere realizar la simulación. En este manual se explica la manera más rápida (Calculo_Cbus_V2), que a su vez es la más compleja (un paso intermedio para entender este código sería el m-file Calculo_Cbus_V1).
En este apartado se establece la versión dos (Calculo_Cbus_V2) habilitando esa línea de código y además existe la posibilidad de establecer un punto de continuación de simulación (esta opción solo se dispone en Calculo_Cbus_V2 por lo que en las otras con habilitar la línea de código con su versión será suficiente). El punto de continuación sirve para poder parar las simulaciones en un momento concreto intencionada o accidentalmente y poder reanudar su marcha donde se dejó. Se puede hacer de dos maneras:
 - Caso_comienzo: se utilizará esta forma si se ha parado la simulación intencionadamente y no se ha borrado ninguna variable que se utilice, es decir, que no haga falta cargar el último caso guardado. Si esta es la forma de continuar, se pondrá el número del último caso que se ha simulado, que se corresponde con el que se ve en la barra de progreso (no confundir con el número de casos totales). Si esto no es lo que se desea, se establece este valor a -1.
 - porcentaje_guardar: Esta forma de continuación se utiliza si se ha apagado el programa o si se han borrado las variables que se utilizan en él. Si esto ha ocurrido, en el mismo fichero donde se ejecuta el programa se observa cuál es el último porcentaje que se ha guardado (en un archivo .mat) y se deberá establecer el número siguiente (podrá ser una unidad mayor si el número de casos totales es superior a 100 o se deberá sumar el porcentaje que se avanza cada vez que se completa un caso). En caso de no querer utilizar esta opción se pondrá -1.

Si en vez de reanudar se quiere comenzar una simulación, se puede poner a cero la variable Caso_comienzo y a -1 la variable porcentaje_guardar. Otra opción de hacer lo mismo es poner la variable porcentaje_guardar a 1 (si el número de casos totales es superior a 100 o el porcentaje que se avanza cada vez que se completa un caso si el número de casos totales es menor de 100) y a -1 Caso_comienzo (si ambas variables están a -1 o ambas a un valor distinto de -1 también se comenzará desde el principio).

- Condiciones de la simulación: en este subapartado se deben establecer dos parámetros de la simulación, el tiempo máximo de simulación (siempre comienza en 0) por el cual se limita cuando será el tiempo de hueco y el modo de simulación. Este modo tendrá que ser acorde con la versión del programa y el modelo que se ha escogido (algunos modelos de Simulink no permiten todos los modos, aunque no es el caso del utilizado para describir este manual). Ambos parámetros se deben introducir como string, y el segundo de ellos (modo de simulación) se hará habilitando la línea de código que se considere oportuna de las tres que hay.
- Chopper: en este apartado se introducen los valores límites de la histéresis del chopper así como la tensión nominal del bus.
- Demandas de potencia: se determinará la potencia que el control hará que se genere o se consuma, tanto activa como reactiva. Con estas potencias se calcularán las corrientes que deben circular por el rotor.
- Parámetros máquina: hay que elegir cuál de las dos máquinas se utilizará y por tanto, que parámetros serán los que se van a cargar. Se debe tener en cuenta que dependiendo de los parámetros de la máquina y de algunas de las variables que se introducen en el segundo apartado se calculan los valores del controlador.
- Tiempo y tipo del hueco: define el instante en el que se producirá el hueco en tiempo y el instante de las curvas de tensión. Esta forma de precisar el tiempo de hueco no tendrá efecto si se trata de hueco trifásico, pero es muy importante en huecos bifásicos aislados, ya que hace que en el instante que se produce el hueco, la tensión no sufra discontinuidades y por tanto el flujo libre que se produce sea el máximo. En definitiva, se trata del hueco más severo que puede sufrir la máquina.

Hay que tener en cuenta que el tiempo en el que se produce el hueco no sea superior al tiempo de simulación.

Después de las explicaciones del tiempo de hueco existen unas líneas de código que se deshabilitarán o se habilitarán dependiendo del tipo de hueco que se desee. Se pueden seleccionar huecos monofásicos, bifásicos a tierra, bifásicos entre fases (los más perjudiciales) o trifásicos.

4.2.2. “Parametros G8X V3 2”

En este m-file se establecerán los principales parámetros de la máquina y los que no se modificarán en los casos dispuestos para la simulación. A continuación se mencionan los principales campos que hay que establecer, pero en el propio m-file se explican:

- Resistencia chopper y capacidad de referencia
- Tensión de red: en algunas normativas se establece que el peor caso puede darse cuando la tensión de la red está un 10% por encima de la nominal, por eso partiremos de dicha tensión.
- Parámetros del generador
- Inversor y rectificador
- Filtros (en caso de ser usados por el modelo)

4.2.3. Simulación

Una vez que los m-files anteriores ya han sido modificados tal y como el usuario desea lo que se debe hacer es ir al “workspace” de Matlab y ejecutar el comando “Inicio_codigo”. Por pantalla nos aparecerá una barra de progreso con el número de casos finalizados y el porcentaje completado.

Cuando dicha barra se complete querrá decir que ya se han calculado todas las capacidades de bus óptimas para los distintos casos. Entonces, la barra desaparecerá y en su lugar aparecerá una ventana con una gráfica en la cual se pueden elegir distintos campos: eje x, eje y, título y otras 3 variables en las que se selecciona un valor de los que aparece en las opciones. En la pantalla que ha aparecido (*Figura 10*) se lee además los principales datos de la simulación.

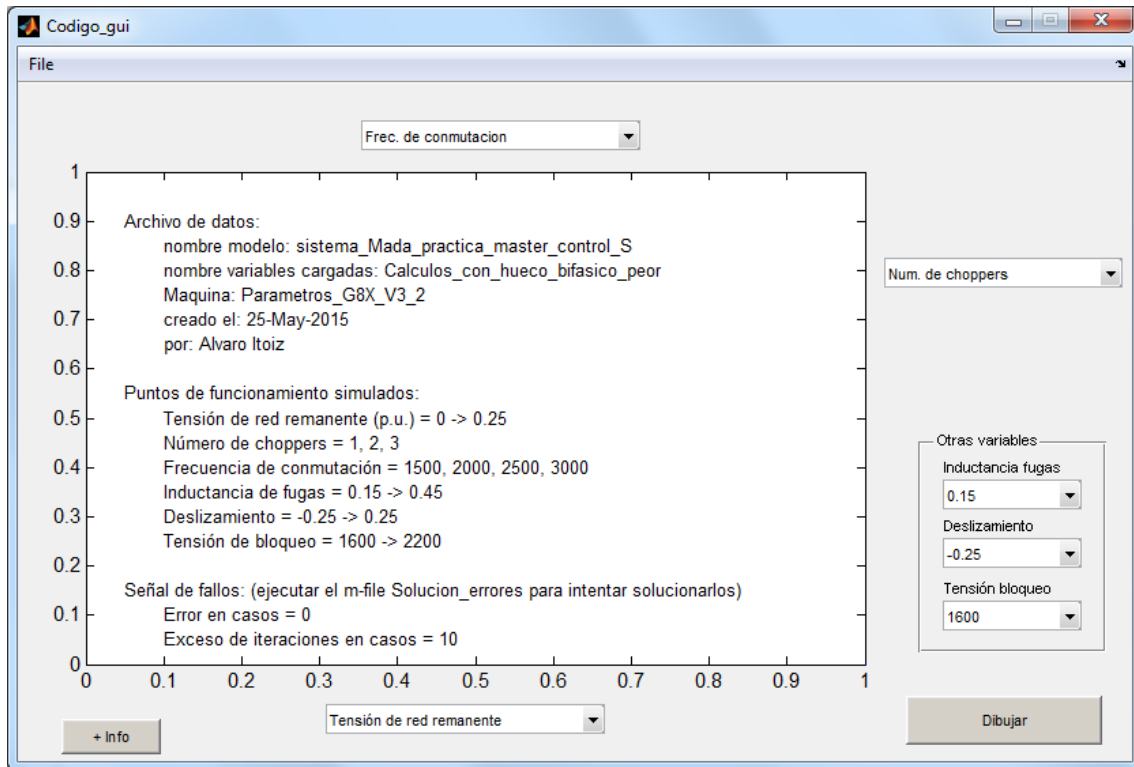


Figura 10: Visualización de la pantalla que se le presenta el usuario para dibujar los valores de capacidad calculados.

Un dato interesante que aparece en pantalla (Figura 10) es el número de casos que han fallado o que no se han calculado por necesitar un número grande de iteraciones (más de 30). Cuando se dan estos casos la capacidad de bus que se guarda en la matriz es cero, por lo que es se debe conocer para evitar malentendidos con las gráficas que dibuje.

Existe la opción de ejecutar desde el workspace en ese mismo instante el m-file Solucion_errores, mediante el cual se realizará de nuevo el cálculo de los puntos conflictivos con cierta relajación en los parámetros que aceptan la aproximación y en el número máximo de iteraciones. Además, se representará por pantalla el valor de tensión máxima de bus en función de la capacidad para cada uno de los casos.

La aproximación se cumplirá cuando la diferencia entre el valor de capacidad que da la tensión máxima por debajo de la límite y el que la por encima están separados por menos de 10 microfaradios. Se debe cumplir también que la diferencia entre tensiones no sea superior a 100 V.

Dentro de la pantalla destacan dos botones, uno que da la opción de más información (“+ info”) y otro que da la opción de dibujar y también nos genera nueva o nuevas pantallas dependiendo de las variables seleccionadas (Figura 11). El botón de dibujar realiza las gráficas con las variables que se han escogido para cada campo y el botón de más información despliega una nueva ventana donde aparecerán todos los valores más importantes de la simulación (Figura 12).

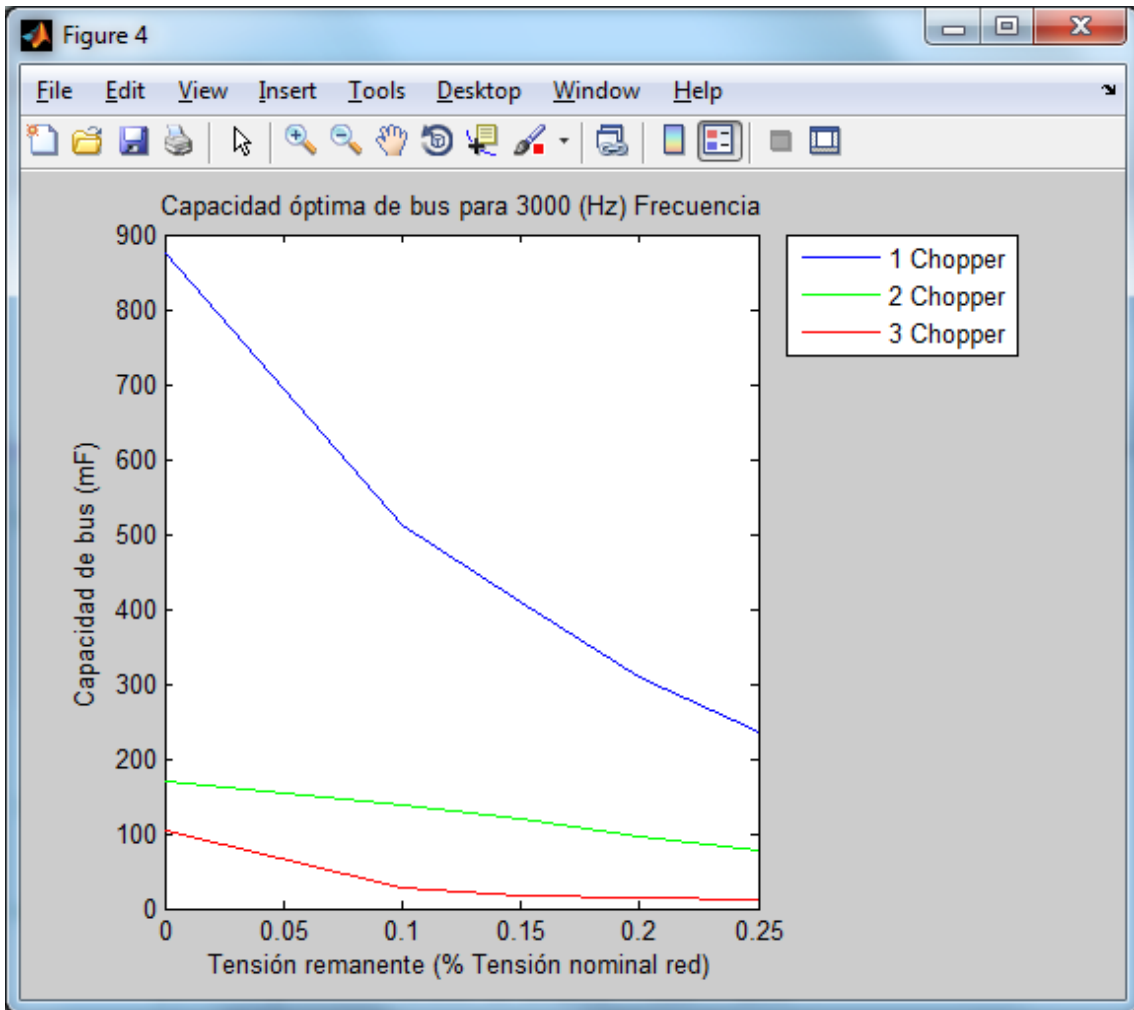


Figura 11: figura obtenida al dibujar los valores de capacidad de bus calculados para determinadas condiciones.

INFORMACIÓN DE LAS GRÁFICAS

<p>PARÁMETROS DE LA MÁQUINA</p> <p>Potencia nominal = 2060000 W Tensión nominal estator = 690 V Resistencia estator + trafo = 0.00164 Ohm Resistencia rotor = 0.00179 Ohm Inductancia mutua = 0.0025052 H Pares de polos = 2 Inercia = Inf N*m Tiempo discretización = 2.5e-006 s</p> <p>PARÁMETROS DE LA RED</p> <p>Tensión antes del hueco = 759 V Frecuencia = 50 Hz Consigna Potencia Activa = -2060000 W Consigna Potencia Reactiva = 0 VAR</p> <p>PARÁMETROS DEL CHOPPER</p> <p>V entrada chopper = 1225 V V salida chopper = 1150 V V límite consigna = 1350 V Tensión de bus nominal = 1090 V</p>	<p>VARIABLES ELEGIDAS</p> <p>Tensión de red remanente = 0 0.1 0.15 Chopper = 0 1 2 3 Frecuencia de conmutación = 1500 2500 Hz Inductancia fugas = 0.25 p.u. Inductancia fugas rotor + filtro = 0.00017803 H Inductancia fugas estator + trafo = 0.00017803 H Deslizamiento = -0.05 % Velocidad de giro = 1200 rpm Tensión de rotor bloqueado = 1824 V Ns/Nr = 0.31364</p>
---	---

Figura 12: pantalla de parámetros desplegada al clicar el botón "+ info" de la GUI.

4.3. Cálculo de las capacidades

Si el usuario solamente quiere hacer el cálculo de las capacidades óptimas de bus y finalizar con la montaña de resultados que se generará en el .mat el proceso es sencillo. Debe hacer lo mismo que se expresa en el apartado 4.2. (cálculo y dibujado de las capacidades) y en el momento que se abra la pantalla para dibujar las gráficas bastará con cerrarla de la “x” de la parte superior derecha.

El usuario dispondrá de una serie de .mat en los que se han ido guardando los casos que ha simulado. El archivo que contiene el conjunto total es aquel que no tenga ningún número al final del nombre y previo a la extensión del archivo (.mat). Por lo tanto, dicho archivo es el más interesante en ser guardado.

4.4. Dibujado de las capacidades

Si el usuario ya dispone de la montaña de datos guardada en un .mat y lo que quiere hacer es dibujar algunos de los valores debe seguir los siguientes pasos.

Primero deberá abrir el m-file “Inicio_codigo_con_datos”. En dicho archivo deberá establecer la carga del fichero en el que se encuentran los resultados que previamente ha calculado. Una vez que este comando se ha establecido correctamente deberá ejecutar el m-file desde el “workspace” de Matlab y accederá directamente a la pantalla de dibujado de gráficas. Una vez en esa pantalla deberá seguir los pasos que se explican en la parte final del apartado 4.2.3 (Simulación).

5. CONCLUSIONES

En la actualidad, la penetración de energía eólica en el sistema de generación eléctrico mundial está creciendo enormemente y con ello están apareciendo distintos problemas. Este aumento en la penetración contribuye al paso de una generación centralizada y regulable a una generación distribuida y no predecible al 100%, que hace que la complejidad del sistema aumente.

Al aumentar la penetración de la eólica, los requisitos que se le piden son cada vez más severos y se acercan más a los exigidos a las centrales de generación convencional. Uno de esos requisitos es el tema que ha afectado principalmente al presente proyecto (huecos de tensión).

La energía eólica no dispone de una única topología de generación, y por lo tanto, los requisitos no les afectan de la misma forma. El presente proyecto se ha centrado en la topología MADA, que es la topología que predomina en las máquinas instaladas (*Figura 5*).

El objetivo principal de este proyecto ha sido el de dimensionar con mayor ajuste la capacidad que este tipo de topología tiene entre el convertidor del lado de máquina y el del lado de red (convertidor back-to-back). Dicha capacidad tiene el principal cometido de almacenamiento de energía y lo que se ha hecho es estudiar su funcionamiento en las distintas condiciones a las que se verá expuesta.

Según se ha estudiado, las mayores exigencias a este componente se dan cuando se producen transitorios en la máquina, y esto a su vez se produce con las variaciones de tensión de la red eléctrica. El fenómeno que produce las principales variaciones de tensión de red es conocido como hueco de tensión y es uno de los requisitos actuales de los códigos de red para la energía eólica. La problemática que los huecos de tensión acarrearán a la máquina doblemente alimentada está estudiado a fondo en [2], y en ello se basa parte importante del proyecto.

Para llevar a cabo el cálculo de la capacidad de bus, se requirió la realización de una herramienta informática a la que fijando unos parámetros de la máquina y dando unos rangos de funcionamiento para otros, calculase automáticamente la capacidad de bus óptima para cada punto.

Esta herramienta se ha basado en un modelo de Simulink que utiliza Simpower y sobre el que se estudian los efectos de los huecos de tensión.

La herramienta ha sido diseñada para poder calcular de forma iterativa la capacidad de bus óptima dependiendo de los parámetros de la máquina y de la red que más afectan a la energía que se verá desde el bus de continua. Este amplio rango de valores modificables con el que se calcula la capacidad óptima de bus le da mayor complejidad a la herramienta, y también a la comprensión de los resultados. Para facilitar la visualización y comprensión de los resultados, se le ha añadido una pequeña GUI de dibujado para que el usuario pueda definir algunas de las variables y ver las distintas gráficas que se generan.

Las mayores ventajas de la herramienta vienen dadas por su versatilidad a la hora de cargar distintos parámetros de máquina y distintos modelos (gran dependencia). Así como por la sencillez de análisis de la matriz de resultados, gracias a la GUI de dibujado, y por su forma de guardar automáticamente los resultados.

Un apartado que ha sido clave dentro del diseño de la herramienta es el intento de agilizar las simulaciones en cadena, lo cual ha aportado distintas soluciones, líneas de trabajo futuras y mejoras a las actuales formas de resolución.

Las mejoras obtenidas en este tiempo dedicado a la agilización han sido considerables, ya que se ha multiplicado por cuatro la velocidad de ejecución. Se ha pasado de tardar aproximadamente mes y medio para la simulación completa de unos 12000 casos a tardar alrededor de 12 días. Algunos de los puntos más relevantes por la agilización que han proporcionado son:

- Inicialización de la capacidad de bus con la calculada previamente.
- Digitalización del control del inversor.
- Aplicación de los modos Accelerator y Rapid Accelerator de Simulink.

También destacar que se ha invertido gran número de horas en el intento de agilizar la simulación por medio de una toolbox de Matlab que permite paralelizar los núcleos del procesador sin obtener al final el éxito esperado.

Por la versatilidad y por su rápido cálculo de la capacidad óptima para cada caso (si solo se calcula uno) se cree que es un programa útil y que puede servir de gran ayuda en el dimensionado de este componente tan importante dentro de los convertidores (espacio que ocupa, peso y precio).

Finalmente, se valora muy satisfactoriamente la relación que ha habido entre la universidad y la empresa para el desarrollo del presente proyecto y para el aprendizaje del alumno en un campo en el que se ha necesitado un tiempo importante de introducción debido a su complejidad.

6. LÍNEAS FUTURAS

Durante la realización del proyecto se han ido encontrando preguntas que abrían distintos caminos por los que continuar con la investigación. Las decisiones tomadas, así como la limitación de tiempo, han hecho que algunas de estas vías no hayan sido exploradas y por tanto deban de ser mencionadas por si se considera que deben investigarse en un futuro.

A continuación se mencionan las principales vías que se han dejado pendientes y se considera que pueden ser relevantes.

6.1. Dimensionado en corriente

Los condensadores, además de dimensionarse por su capacidad, se dimensionan por la corriente que va a circular por ellos. En este tema, el presente proyecto no se ha metido, pero sería interesante hacerlo para disponer del dimensionado óptimo completo de este componente.

Destacar que en este aspecto del dimensionado en corriente es en el que principalmente se centra el artículo de Ingeteam [3].

6.2. Aceleración de la simulación

Pese a que gran parte del esfuerzo del presente proyecto ha sido dedicado a la agilización de las simulaciones se han visto distintas ramas que pueden ayudar y a las cuales no ha dado tiempo.

6.2.1. Paralelización de núcleos implementando la herramienta Rapid Accelerator

En el presente proyecto se ha conseguido realizar la paralelización de los núcleos funcionando con Simulink en Modo Normal. Con esto, se consigue una mejoría respecto a funcionar en modo normal sin paralelización, pero la mejoría es prácticamente nula si sin paralelización se trabaja en Accelerator Mode o en Rapid Accelerator Mode. Destacar que el ordenador utilizado dispone de solo dos núcleos.

Se dedicaron algunas horas de trabajo al intento y la investigación de cómo implementar el Rapid Accelerator Mode con la paralelización de núcleos, pero finalmente se decidió centrarse en otros temas que se consideraron más importantes. Por lo tanto, se cree que este podría ser un camino que permita agilizar el programa.

No obstante, se debe de tener claro que para la paralelización de los núcleos es necesaria la licencia de la toolbox Parallel Computing y de la utilización de variables estructura.

6.2.2. Inicialización “instantánea” de la máquina

Se dice inicialización instantánea de la máquina porque lo que se ha realizado en este proyecto es la incorporación de una rampa a la tensión de red inicial que permite que se alcance el régimen permanente en menos tiempo, pero no se ha sido capaz de utilizar la inicialización de la máquina para que en régimen permanente parta del instante inicial.

Cabe destacar, que se desconoce el por qué dicha inicialización no funciona como se espera en el manual de Matlab. También hay que reseñar que con las modificaciones de la máquina asíncrona realizadas previamente al modelo de Simulink, se han perdido alguna de las opciones que tiene la máscara original.

6.2.3. Análisis de los resultados

Una vez que se disponga de la montaña de datos para una de las máquinas, se puede observar para la variación de qué parámetros cambia menos la capacidad de bus y de esta forma, añadir inicializaciones de la capacidad de bus según semejanza con otros puntos.

Esta programación nos ayudaría a agilizar el cálculo, ya que el número de iteraciones se reduciría en gran medida.

6.2.4. Entender y mejorar el tiempo de simulación

Se observa, que dependiendo del valor de la capacidad de bus, el tiempo de cálculo de cada caso varía. Contra menor es la capacidad, mayor es el tiempo computacional necesario.

Se cree que la posible solución de esto sería modificar el Solver de Simulink para que no trabaje con pasos de tiempo variables, pero no se sabe si esto será la solución ya que es un tema que se desconoce.

6.3. Validación del modelo de Simulink y solución de errores

Las simplificaciones realizadas al modelo de Simulink de Ingeteam para la construcción de uno más sencillo han consistido en la sustitución del rectificador por una fuente de tensión y de la supresión de los distintos filtros. Esta simplificación no ha sido contrastada de forma minuciosa pero se cree que debería realizarse si se va a continuar con este modelo.

6.3.1. Implementación del control del rectificador

El modelo de Simulink implementado que tienen menor complejidad trabaja sin convertidor de lado de red. En vez del convertidor tienen una fuente de tensión que mantiene la tensión constante en el bus hasta el momento del hueco. Cuando se produce el hueco, la fuente de tensión deja libre a la capacidad de bus y la tensión fluctúa dependiendo de la energía que procede de la máquina.

Se cree que no debe haber gran influencia de este convertidor, ya que al producirse el hueco no tiene mucha capacidad de evacuación de energía del bus. No obstante habría que comprobarlo introduciendo su modelo y su control.

6.3.2. Análisis de resultados

Los resultados que se han obtenido de la herramienta informática dependen en gran medida del modelo de Simulink utilizado, por lo que sería conveniente contrastar los resultados.

Posteriormente al cálculo de las capacidades óptimas de bus, existe otro m-file dedicado a la solución de los problemas que se han dado en estos. Esta solución se hace mediante la relajación de las condiciones de la herramienta, pero consideramos interesante que en vez de forma automática, dicha solución pudiera ser llevada a cabo manualmente por el usuario. Esto dotaría de mayor rigurosidad a la solución de los casos problemáticos.

6.4. Trabajo con frecuencias de conmutación bajas

Cuando se trabaja con frecuencias de conmutación bajas lo que ocurre es que la necesidad de rapidez del micro disminuye. Por lo tanto, se podrá utilizar un micro más simple y económico, pero si esto sucede, los retardos de cálculo (son inversamente proporcionales a dos veces la frecuencia) aumentarán.

Si el retardo aumenta puede que el control pierda la estabilidad, ya que desde la medida de las variables hasta la actuación del mismo ha transcurrido excesivo tiempo. Por lo tanto, para trabajar con frecuencias por debajo de los 2000 Hz se cree que el estudio del control de la máquina debe ser más minucioso que el realizado en el presente proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

Libros

[1] Gonzalo Abad; Jesús López; Miguel Rodríguez; Luis Marroyo; Grzegorz Iwanski. “Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation”. United States of America: IEEE Press Editorial Board, 2011.

[2] Jesús López Taberna (2008): “Comportamiento de generadores eólicos con máquina asíncrona doblemente alimentada frente a huecos de tensión”. Tesis Doctoral.

Artículos

[3] Artículo de la empresa Ingeteam; “Estudio optimización capacidad de bus”. 2010.

Páginas web

[4] Wikipedia [en línea]. “Coste de la electricidad según fuente”. [Consulta: 27 abril 2015]. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source

[5] “Carbon Prices Drive Clean Energy Innovation”. [Consulta: 29 abril 2015]. Disponible en: <http://rameznaam.com/2014/03/11/carbon-prices-drive-clean-energy-innovation/>

[6] FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. “Levelized cost of electricity renewable energy technologies” (November 2013). [Consulta: 27 abril 2015]. Disponible en: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/study-levelized-cost-of-electricity-renewable-energies.pdf>

[7] Anca D. Hansen, Lars H. Hansen. “Market penetration of wind turbine concepts over the years”. [Consulta: 04 mayo 2015]. Disponible en: http://www.ewea.org/ewec2007/allfiles2/147_Ewec2007fullpaper.pdf

[8] Plant Engineering. “Why full-power wind converters are not overtaking the market yet” (September 2013). [Consulta: 06 mayo 2015]. Disponible en: <http://www.plantengineering.com/single-article/why-full-power-wind-converters-are-not-overtaking-the-market-yet/9726ecde561e15f01ff3271d1c6414.html>

[9] G. Jarrad Wright, IEEE, M. Paul Tuson and M. John Van Coller, IEEE. “Studies for wind energy facility grid code compliance in South Africa”. (June 2013). [Consulta: 15 enero 2015]. Disponible en: http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/Energize%20RE%202013/energize-re-supplement_gc-grid-code.pdf