



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio del efecto de aumentar la penetración de
generación renovable en la red de transporte

Study of the effect of increasing the penetration of
renewable generation in the power transmission grid

Autor

María Pilar Pérez Puyod

Director

José Luis Bernal Agustín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, EINA

2017



**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. MARÍA PILAR PÉREZ PUYOD

con nº de DNI 76923845T en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES, (Título del Trabajo)
ESTUDIO DEL EFECTO DE AUMENTAR LA PENETRACIÓN DE GENERACIÓN
RENOVABLE EN LA RED DE TRANSPORTE

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21/09/2017

Fdo: MARÍA PILAR PÉREZ PUYOD

Estudio del efecto de aumentar la penetración de generación renovable en la red de transporte

RESUMEN

En los últimos años, España se ha estancado en el uso de energías renovables. Uno de los escenarios que más importancia energética tiene en España, es Galicia. La eólica es, quizás, la que tiene un mayor potencial de crecimiento. En la comunidad gallega tiene un protagonismo indiscutible, dado el grado de avance del Plan Eólico de ésta.

Galicia es una comunidad ideal para posibilidad de instaurar sistemas de generación renovable. Su situación geográfica hace que esté en contacto directo con el Océano Atlántico y por lo tanto, sea uno de los puntos de la Península Ibérica donde las borrascas atlánticas golpean con más fuerza. Es por eso que Galicia, por su posición estratégica, se convierte en una zona óptima para la instalación de parques eólicos. Galicia tiene un gran potencial de aprovechamiento de energías autóctonas, entre las que se destacan las renovables (hidráulica, eólica y biomasa). En términos de producción de energía eléctrica, las energías renovables de Galicia aportan un 25% al total de España.

La finalidad de este trabajo es poder aumentar la generación de energía en distintos puntos de la comunidad gallega. Para llegar a eso, lo primero que se ha hecho ha sido estudiar la parte de la red que corresponde a la comunidad de Galicia. Para ello, se han utilizado diferentes mapas de la red eléctrica de transporte y, a partir de ellos y de los datos correspondientes a la red el día 17 de abril de 2012, se ha conseguido crear un modelo simplificado en un programa informático de simulación de sistemas de potencia. Este modelo nos permitirá su modificación tantas veces como queramos; pudiendo así llevar a cabo todas las hipótesis que sean necesarias. En el proceso de realización del caso base ha habido que recopilar datos de archivos que contenían los nudos de toda España, con su generación y carga, y los parámetros de las líneas que unen dichos nudos para obtener, en nuestro modelo simplificado, unas líneas lo más parecidas posibles a las existentes realmente. Se han escogido cuatro nudos pertenecientes a la red real, representados en el modelo, como objetivo para el aumento de la penetración eólica a través de ellos, por encontrarse en situaciones favorables para la obtención de energía eléctrica a partir de la energía eólica.

Para la realización de este estudio, una vez hemos recopilado los datos, se ha hecho el modelo del caso base. Para ello, se ha utilizado el simulador informático PowerWorld. Este programa permite introducir los datos que habíamos recogido anteriormente y, una vez incluidos, realizar la simulación para comprobar que funciona correctamente.

Posteriormente, pasamos a introducir los datos en las distintas horas y a estudiar los resultados de pérdidas antes de empezar a introducir una mayor generación. Por último, llevamos a cabo el aumento de la generación en los 4 nudos que hemos marcado para ello y comparamos con los anteriores para obtener una razón que nos explique el por qué de estos cambios.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	6
3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	7
3.1 ESTUDIO DE MAPAS Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA RED .	7
3.2 CREACIÓN DEL CASO BASE.....	7
3.3 SIMULACIÓN POR TIEMPOS	9
3.4 INCREMENTO DE LA GENERACIÓN	12
4. RECOPIACIÓN DE DATOS Y REALIZACIÓN DEL MODELO	13
4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS	13
4.2 REALIZACIÓN DEL MODELO	13
5. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS Y RESULTADOS OBTENIDOS	18
5.1 SIMULACIÓN SIN MODIFICAR GENERACIÓN	20
5.2 SIMULACIÓN CON INCREMENTO DE GENERACIÓN	23
6. CONCLUSIONES	27
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
ANEXOS.....	29

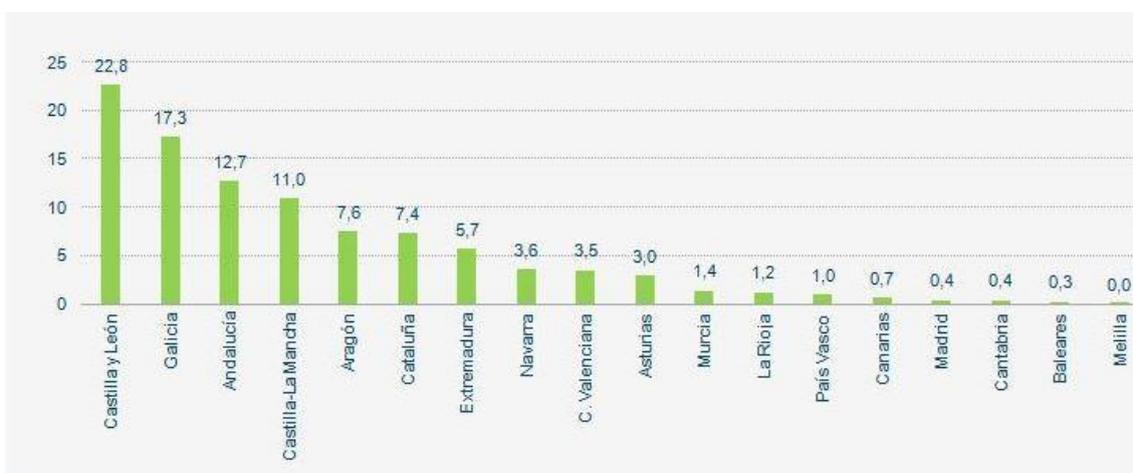
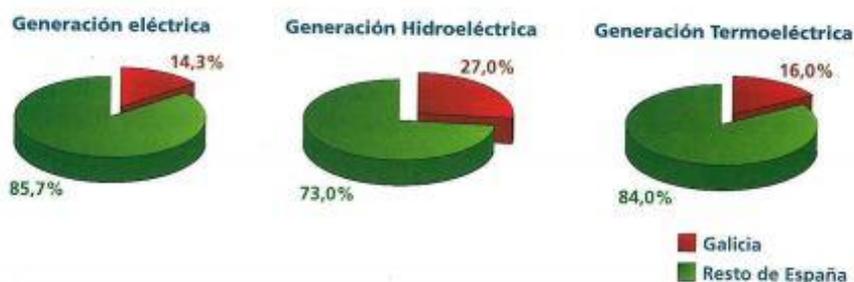
1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca en el desarrollo del Trabajo Fin de Grado para optar al grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales de Universidad de Zaragoza.

El motivo de la elección de este trabajo se debe a que, de todas las asignaturas estudiadas en este grado, a mi me han resultado de más interés las relacionadas con el campo de la electricidad.

En este estudio, se va a analizar la posibilidad de aumentar la generación eólica, y por lo tanto el impacto que esto tendría en la red de transporte. El estudio se hace en la comunidad autónoma de Galicia, que es una localización ideal para la implantación de generación eólica por distintos factores:

- El 27% de la producción nacional de energía hidroeléctrica y más del 16% de termoeléctrica convencional tiene su origen en Galicia.
- El 14,3% de toda la energía eléctrica producida en España proviene de Galicia.
- Galicia es la segunda comunidad autónoma, por detrás de Castilla y León, en generación de energía renovable.



Estos datos se han sido estudiados por el Instituto Energético de Galicia [1] la Red Eléctrica de España [2], y son evidencias de que la elección de Galicia para un estudio como el que se va a llevar a cabo, es una muy buena elección.

Como se puede observar en las ilustraciones 3 y 4, en Galicia hay unas zonas en las que la velocidad del viento es bastante elevada y coincide también con las zonas de elevada densidad media de potencia del viento. Esto indicaría que esas zonas son ideales para una implantación mayor de energía eólica. Éstas se encuentran sobretodo en las zonas de contacto directo con el océano Atlántico.

De todos los nudos de Galicia proporcionados por los mapas de la Red Eléctrica de España [2], se van a seleccionar algunos de los situados en las zonas favorables de viento. He querido seleccionar alguno de 220 kV y alguno de 400 kV para poder apreciar la diferencia de aumento entre unos y otros. Los nudos seleccionados son:

- Sidegasa
- Vimianzo
- Porto Do Mouros
- As Pontes de García Rodríguez

Aunque el aumento de generación eólica es el último punto del trabajo, es importante saber desde el principio en cuáles lo vas a realizar para ir teniendo en cuenta, en todas las simulaciones, lo que se va viendo en ellos.

Una vez ya tenemos los nudos elegidos, pasamos a hacer la simulación. Para ello hay que introducir todos los nudos, generadores y líneas estudiados con el mapa de Galicia de fondo en el programa informático PowerWorld.

Hay que tener en cuenta que este estudio es una aproximación de la realidad, en ningún caso se corresponde exactamente con ella. Por eso pueden aparecer saturaciones de línea donde no debería haberlas o resultados distintos a los esperados.

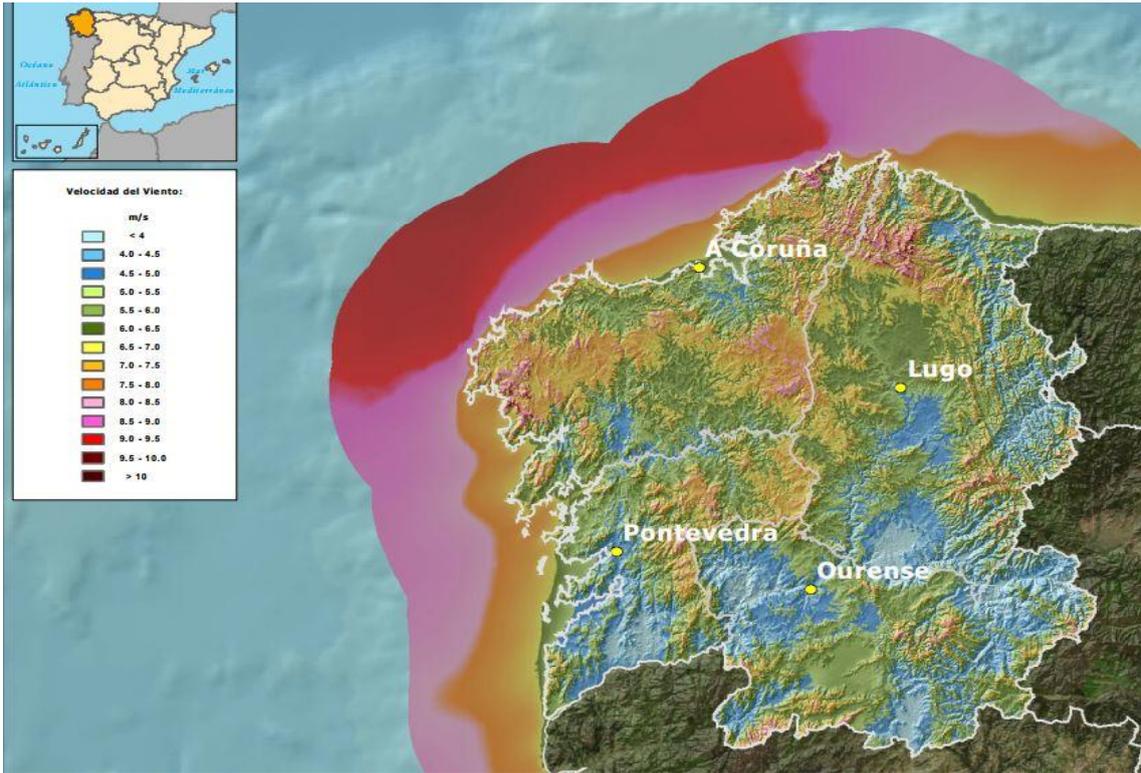


Ilustración 3. Velocidad media anual del viento a 80 m de altura. Fuente: [3]

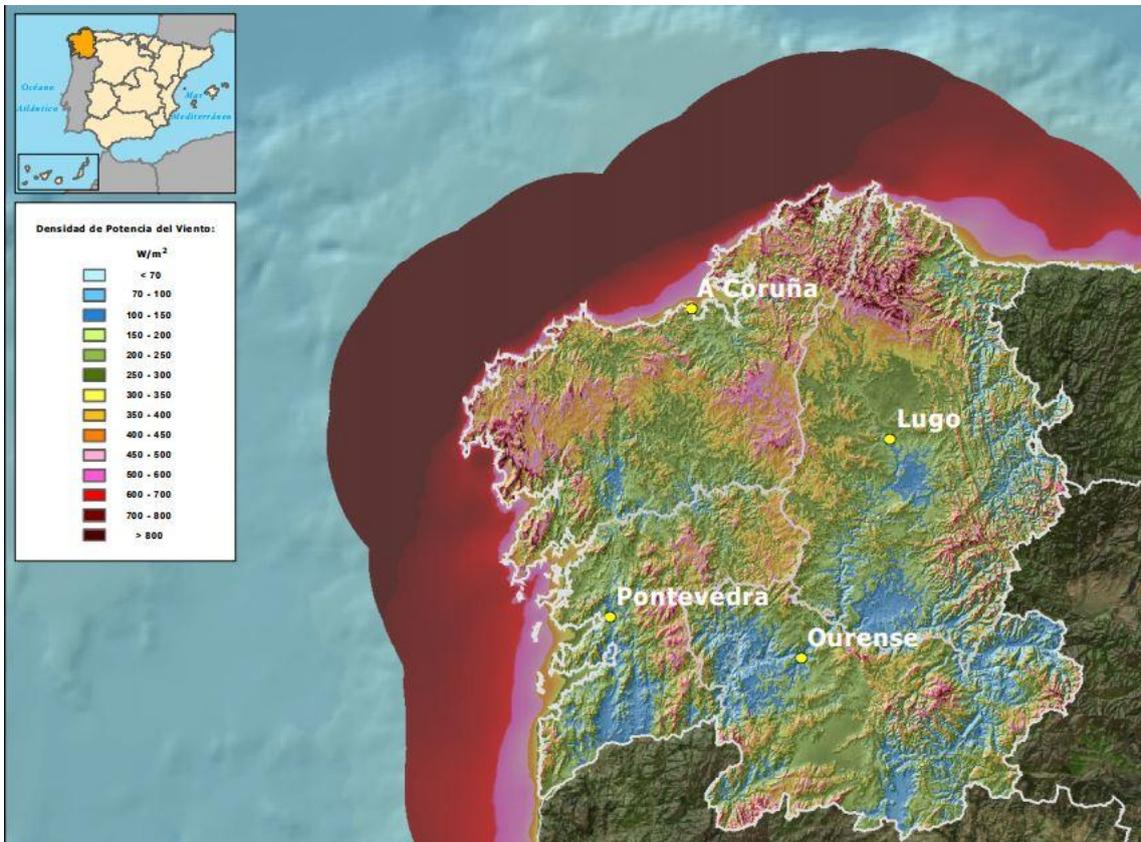


Ilustración 4. Densidad de potencia media anual del viento a 80m de altura. Fuente: [3]

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

Las energías renovables son fundamentales en el sistema energético gallego. Esto se debe principalmente a su situación geográfica. Galicia se encuentra en contacto directo con el Océano Atlántico y, por lo tanto, eso hace que sea uno de los puntos de la Península Ibérica donde las borrascas atlánticas golpean con más fuerza.

Al abarcar una comunidad autónoma con tantos parques eólicos, es necesario la búsqueda de un gran número de nudos para que el resultado sea lo más preciso posible. Este trabajo se ha llevado a cabo recopilando datos de nudos y líneas de Galicia de la página de la Red Eléctrica de España [2] y usándolos para calcular unos parámetros que nos permitan estudiar el posible aumento de generación eólica en los distintos parques.

Para la realización de este trabajo se han utilizado datos del 17 de abril del año 2012. Hasta ese momento, la Red Eléctrica de España [2] colgaba públicamente los datos de los nudos, su generación, su carga y las líneas que los conectaban. A partir de ahí dejaron de publicarlos.

A la hora de abordar el trabajo, los objetivos principales que se buscan son:

- Determinar, aproximadamente, la red eléctrica de alta tensión de Galicia.
- Obtener los datos aproximados de generación y consumo de Galicia.
- Modelizar un caso base y simularlo considerando la generación actual.
- Plantear casos considerando un aumento en la generación basada en fuentes renovables.
- Estudiar los resultados obtenidos y plantear soluciones en los casos de saturación de líneas.
- Obtener conclusiones.

El alcance que puede tener este estudio es la utilización del mismo en alguna asignatura de grados de ingeniería, como puede ser Sistemas Eléctricos de Potencia, en la que se desarrollan y se aplican los fundamentos del análisis del comportamiento de las líneas y las redes eléctricas. Este trabajo podría ser de utilidad para visualizar cómo se trabaja con casos reales, la utilización de datos y mapas que permiten situar los nudos en su posición real y no en un espacio abstracto.

También podría servir de base para seguir investigando en temas de generación de energías renovables. En este caso se trata de generar la mayor cantidad de energía eléctrica a partir de la eólica; pero se podría utilizar para ver cómo funciona con otros tipos de energías renovables.

Finalmente, con una licencia del programa informático PowerWorld completa, que permitiera introducir un número ilimitado de nudos, se podrían hacer modelos mucho más exactos. Hacer modelos que impliquen más de una comunidad autónoma o, incluso, España entera podría ser muy interesante ya que se apreciaría, no solo el cambio de consumo por horas, si no como varía este consumo dependiendo en la zona de España en la que te encuentres.

3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Este estudio cuenta con 4 fases principalmente: estudio de mapas y obtención de los parámetros de la red, creación del caso base, simulación por tiempos y, por último, incremento de la generación en distintos nudos.

3.1 ESTUDIO DE MAPAS Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA RED

En primer lugar, se necesitaba saber cómo era la comunidad de Galicia, ver la cantidad de nudos que tiene e ir centrándose en los que se seleccionarían para hacer el caso base. En nuestro caso, se ha tenido en cuenta solamente parte de la red eléctrica gallega, más concretamente los nudos de tensión más elevada, de 400kV y 220kV.

Para esta parte no se necesitaba ninguna herramienta especial. Los ficheros de datos eran .raw por tanto, al ser ficheros de texto, nos sirvió el uso del programa Word para poder abrirlos y estudiarlos con detenimiento.

3.2 CREACIÓN DEL CASO BASE

A continuación, debía plasmar esos datos en un programa que me pudiera simular el sistema simplificado de la red de Galicia. Para ello, el programa utilizado fue PowerWorld Simulator v.19[4], que es un paquete interactivo de simulación de sistemas de potencia. Este programa lo había usado con anterioridad en las prácticas de la asignatura de Sistemas Eléctricos de Potencia aunque no con tanto detalle.

Una vez identificados los nudos que se querían introducir en la simulación, se han colocado aproximadamente en su situación en la comunidad gallega utilizando de imagen de fondo un mapa de Galicia sacado de Google Maps[5], tomando como referencia su situación real mediante los mapas de Red Eléctrica de España [2].

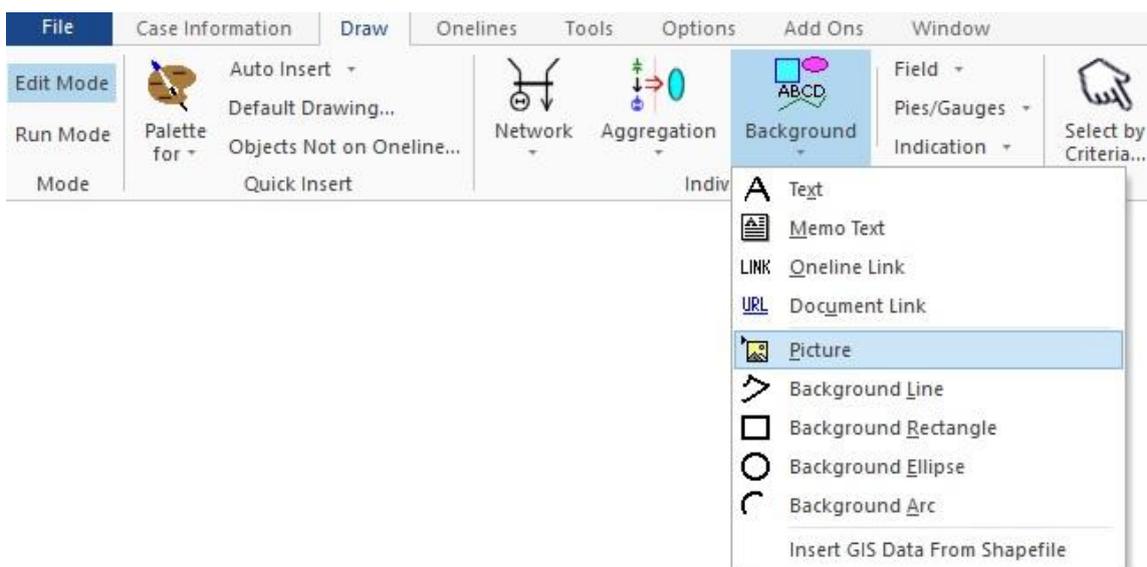


Ilustración 5. Ejemplo de introducción de mapa en PowerWorld. Fuente: [4]

Como se puede observar en la ilustración 5, para añadir una imagen de fondo, debemos ir a la pestaña "Draw" y, una vez ahí, situarnos en la opción "Background" y seleccionar "Picture". Para que se abra la ventana de fotos guardadas en el ordenador, es necesario seleccionar un punto en el fondo blanco, que será el punto donde se copie la imagen. En este proceso de introducción de datos, es necesario estar en el modo de edición, "Edit Mode".

Al tener ya el mapa de fondo introducido, podía empezar a introducir los datos recopilados. Para ello, en la pestaña de "Draw" mencionada antes, hay que situarse en la opción "Network". Como vemos en la ilustración 6, esa opción engloba todos los posibles componentes que queramos meter. Una vez seleccionado el componente que queremos, marcamos un punto de colocación y ya podemos empezar a introducir los parámetros.

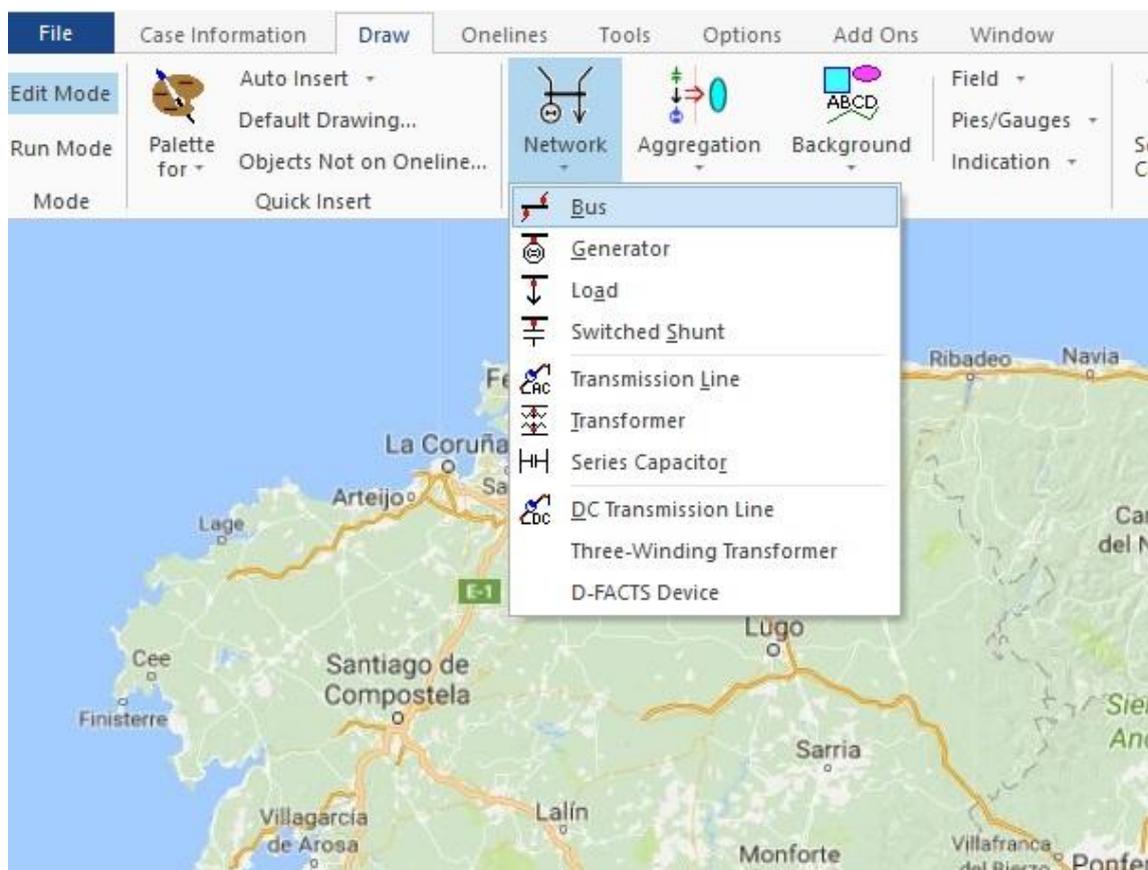


Ilustración 6. Ejemplo de introducción de parámetros de red en PowerWorld. Fuente: [4]

En mi caso, en primer lugar introduje todos los nudos posibles, primero los de 400 kV, ya que tenía menos y así me aseguraba de poner todos, y después los de 220 kV. Una vez introducidos todos los nudos del modelo, introduje la generación de aquellos de los que había encontrado datos y posteriormente las cargas. Por último, fui uniendo los nudos de la manera que me marcaban los archivos e introduciendo los parámetros de las líneas previamente estudiados.

Por último, toca ir al paso de la simulación. En este paso es necesario colocarnos en el modo de ejecución, "Run Mode". Una vez ahí, seleccionar la pestaña "Tools" y darle al símbolo de Play o a la pestaña de "Solve".

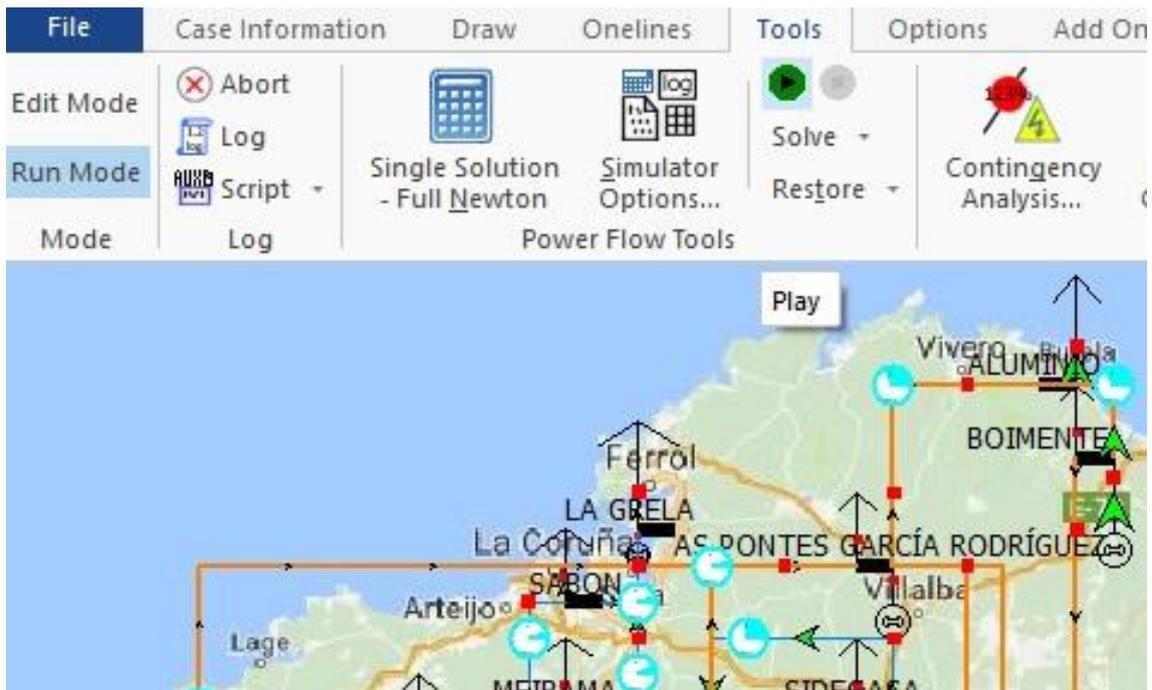


Ilustración 7. Ejemplo de comienzo de la ejecución del sistema en PowerWorld. Fuente: [4]

En cuanto pulsas el símbolo de Play, el sistema se empieza a ejecutar. En ese momento, se puede ver, gráficamente, cómo va funcionando el modelo que se ha creado. Si por algún casual los datos introducidos son imposibles o se crea una situación que el sistema no puede superar, se produce el llamado "Blackout". Eso significaría que el sistema deja de funcionar inmediatamente y se debería cambiar alguno de los parámetros de la red para que volviera a funcionar. Para cambiar estos parámetros, tendríamos que volver al modo de edición y seleccionar los componentes que quisiéramos cambiar.

El programa PowerWorld nos da la posibilidad de mostrar en pantalla los resultados que queramos. En mi caso, solo he querido que se viera el voltaje en los nudos y, gráficamente, la saturación de líneas. Lo he decidido así porque, al haber muchos nudos en una superficie no muy grande, si ponía muchos resultados se ensuciaría el mapa y no se vería con claridad. Aunque no se vean en el mismo dibujo no importa, ya que presionando con el botón derecho cualquier línea, nudo o generador, puedo ir a su ventana de información y me muestra todos los resultados.

3.3 SIMULACIÓN POR TIEMPOS

Para llegar al objetivo final de este trabajo, primero debo meter los datos de las 24 horas del día que había recopilado al principio. Este paso es, en mi opinión, el más interesante de todos ya que te permite ver gráficamente cómo van variando los parámetros en tiempo real.

Si queremos conseguir que se simulen horas distintas con datos diferentes, lo que tenemos que hacer es lo siguiente:

Situados en el modo de ejecución, vamos a la pestaña Tools, y una vez allí seleccionamos "Time Step Simulation".

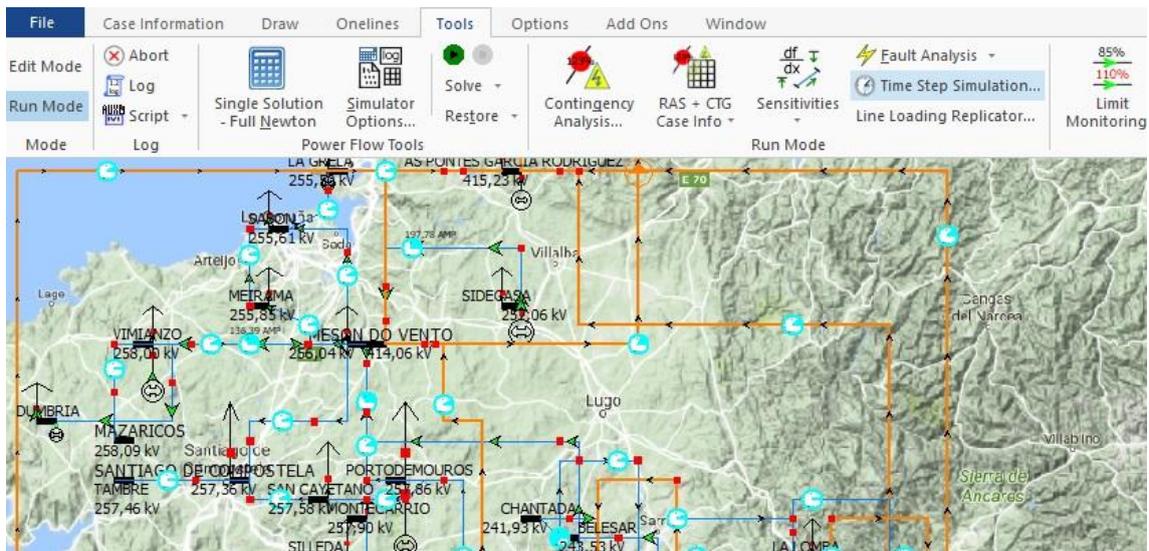


Ilustración 8. Ejemplo Time Step Simulation. Fuente: [4]

Tras haber seleccionado esa pestaña, se nos abre una ventana en la que podremos meter los datos. En un principio está todo vacío pero depende de nosotros que eso cambie. Para introducir las horas del día que quiero, selecciono "Insert Time Points". En esa ventana, me dan la posibilidad de seleccionar el día que quiera del año que quiera, el número de horas que quiero introducir y el intervalo de separación entre esas horas. En mi caso, seleccioné el día 17 de abril del año 2012, que es el día del que teníamos todos los datos, y las 24 horas horas.

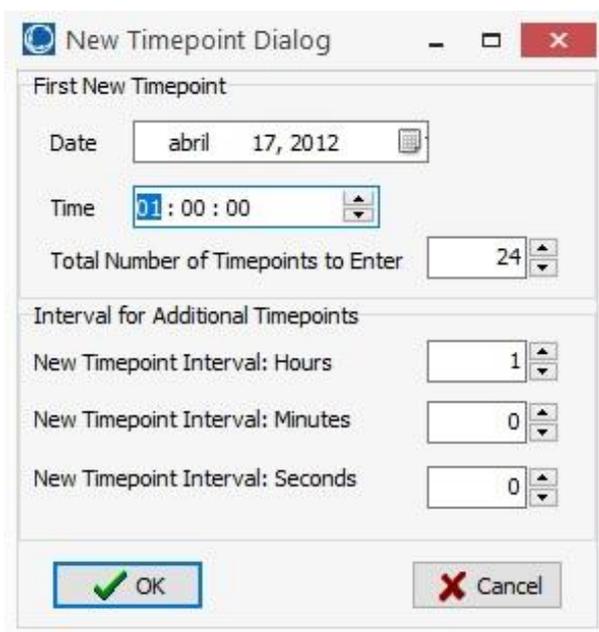


Ilustración 9. Ejemplo introducción de horas en Time Step Simulation. Fuente: [4]

Después de haber introducido esas condiciones, empezamos a meter los datos de carga y generación de los nudos. En el menú de la izquierda, desplegamos la pestaña "Input" y seleccionamos según nos convenga. Yo introduje primero las cargas en MW, después las cargas en MVar y, por último, la generación en MW. Los datos se pueden ir introduciendo uno por uno en el programa o se puede hacer un pegado especial que te copia las celdas en Excel. En mi caso, como había ido guardando todos los datos en tablas de Excel, lo hice de la segunda manera. De esta forma era mucho más rápido ya que podía copiar y pegar directamente todos los datos a la vez en vez de ir uno por uno.

Una vez tenemos todos los datos metidos podemos empezar a simular. Hay dos formas de hacerlo:

- Simulación continua: hace la simulación de las 24 horas en muy poco tiempo pero no te permite ver cómo van variando por hora los parámetros en el dibujo.
- Simulación por tiempos: puedes seleccionar el tiempo que quieras que dure cada hora en la simulación y te permite ver cómo varían los parámetros a tiempo real.

En mi caso, utilicé la segunda opción ya que, para este estudio, es interesante que se vea gráficamente como van aumentando o disminuyendo los parámetros dependiendo de la hora del día a la que te encuentres. Para ello, en el menú de la izquierda, se selecciona "Options" y en "Time Step Simulation Options" se marca Timed y el tiempo que se quiera que dure.

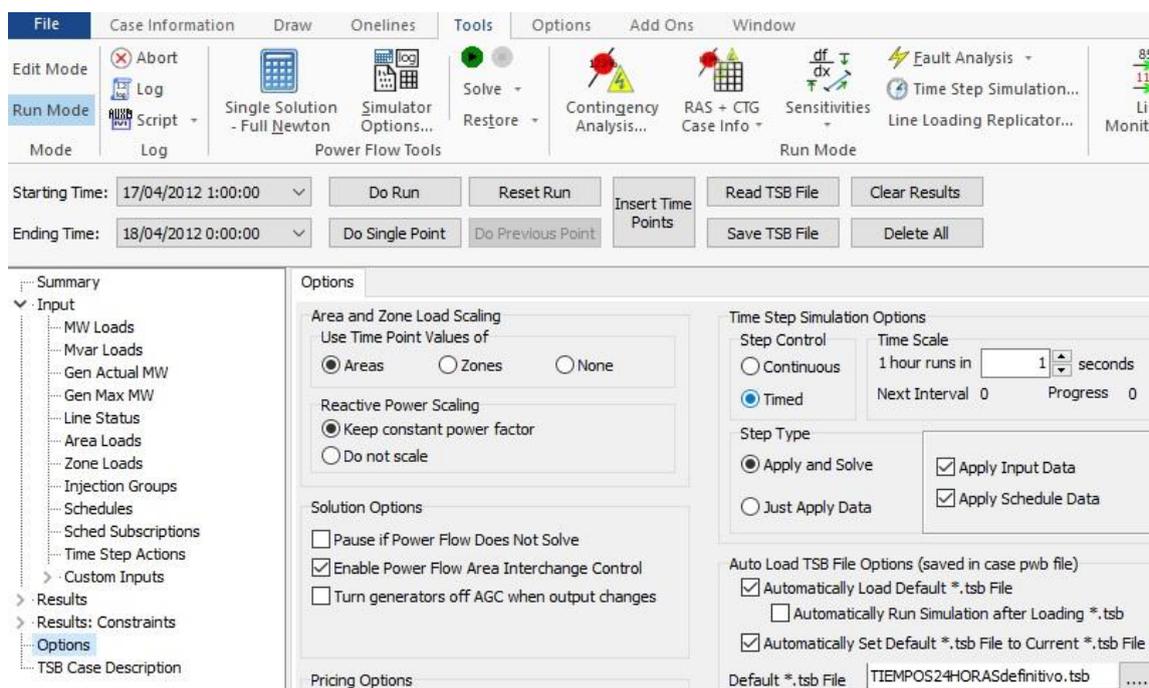


Ilustración 10. Ejemplo de cómo se puede visualizar cada hora por separado. Fuente: [4]

A continuación, para obtener resultados, nos vamos al menú de la izquierda y seleccionamos "Results". En esa pestaña nos metemos en "View/Modify" y, una vez allí, podemos seleccionar los componentes de los que queremos resultados y los resultados que nos interesan. Por ejemplo, en los nudos podría ser interesante ver los kV a las diferentes horas, en las líneas ver la intensidad en Amperios o las pérdidas, etc.

3.4 INCREMENTO DE LA GENERACIÓN

Por último, llega el momento de aumentar la generación de los nudos previstos para ello. Lo que tenemos que hacer para ver los límites de generación es ir parando la simulación en cada hora y, una vez está parado, vamos al modelo y seleccionamos el nudo que queramos modificar. El límite lo obtendremos en el momento que el sistema haga "Blackout" y deje de funcionar. Para hallarlo, vamos subiendo la potencia del nudo hasta que se produce el fallo.

Al tener los límites de los nudos, hay que probar a qué porcentaje de ellos se puede simular el sistema con normalidad y, cuando ya tienes ese porcentaje hallado, aplicarlo a las potencias de esos nudos en las distintas horas. Para la aplicación de ese porcentaje, se puede ir al menú antes mencionado de "Input", a la izquierda de la ventana de "Time Step Simulation" y en los datos de los MW de los generadores, cambiar los que haya que cambiar.

Después de aplicar todo esto, ya podemos simular otra vez y obtener los nuevos resultados. En el anexo 2 se explica con detalle cómo se han ido encontrando los datos y su significado.

4. RECOPIACIÓN DE DATOS Y REALIZACIÓN DEL MODELO

4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

Para estudiar los datos se han empleado los mapas de la red eléctrica (Anexo 1), disponibles en la página de la Red Eléctrica Española [2]. Se ha hecho uso de las secciones 1, 2, 6, 7 y 25 del mapa de la red, siendo el último la leyenda de los demás.

En los ficheros de datos en los que salían los distintos parámetros a las diferentes horas del día salía toda la información de una manera que no se corresponde a la forma en la que la hemos recopilado.

- Los nudos salían con abreviaturas, por tanto, había que ir buscando las distintas líneas con las que conectaban, para ver si la abreviatura se correspondía con el nudo que nos interesaba.
- Fue necesaria la lectura de un manual que explicara la forma de leer los datos de los archivos [6].
- Los archivos de datos constan de 380 páginas por hora, ya que salen los datos de toda la red de España. De estos archivos hubo que seleccionar los datos que nos resultaban interesantes para la realización de este estudio.

En el anexo 2 se explica con detalle cómo se han ido encontrando los datos y su significado.

4.2 REALIZACIÓN DEL MODELO

Una vez recopilados los datos, se procede a meterlos en el simulador, mencionado anteriormente, PowerWorld. Para ello, lo primero que se hizo fue introducir el mapa de Galicia [5] y, a partir de ahí, ir introduciendo los diferentes componentes.

Para este trabajo se ha hecho uso de PowerWorld Simulator v.19 [4]. Esta versión del programa nos limita el estudio a un máximo de 50 nudos, por lo que se intenta hacer una aproximación lo más fiel posible a la realidad de la red eléctrica gallega. Esta versión del programa solo nos pone límite al número de nudos pero del resto de componentes podemos introducir tantos como queramos. Una versión completa del programa nos habría permitido meter el total de los nudos de la red pero no disponemos de ella debido a su precio.

Los nudos que se han introducido en el modelo se pueden ver en la siguiente tabla:

Nº nudo	Nombre	Voltaje nominal (kV)
11005	ALUMINIO	400
11013	BOIMENTE	400
11015	CARTELLE	400
11020	COMPOSTILLA	400
11025	LA LOMBA	400
11038	SILLEDA	400
11040	MESON DO VENTO	400

11045	MONTEARENAS	400
11055	AS PONTES	400
11070	TRIVES	400
21003	ATIOS	220
21005	ALBARELLOS	220
21011	AMOEIRO	220
21020	BELESAR	220
21023	DUMBRIA	220
21026	CHANTADA	220
21028	CARTELLE	220
21030	CASTRELO	220
21040	CONSO	220
21053	FRIEIRA	220
21056	LA GRELA	220
21060	LA LOMBA	220
21062	LOURIZAN	220
21063	LUBIAN	220
21070	MEIRAMA	220
21075	MESON DO VENTO	220
21085	MONTEARENAS	220
21086	MONTECARRIO	220
21092	PAZOS DE BORBEN	220
21095	PONTE BIBEY	220
21105	PORTODEMOUROS	220
21120	PRADA	220
21123	PE SIL MEDA	220
21127	PUEBLA DE SANABRIA	220
21140	RIBADELAGO	220
21145	SAN AGUSTÍN	220
21146	SAN CAYETANO	220
21150	SAN ESTEBAN	220
21160	SAN PEDRO	220
21165	SABON	220
21175	SANTIAGO DE COMPOSTELA	220
21180	SANTIAGO	220
21183	SIDEGASA	220
21190	SOBRADELO	220
21198	SOUTELO	220
21199	SUIDO	220
21202	TAMBRE	220
21215	TRIVES	220
21245	VIMIANZO	220
21250	MAZARICOS	220

Tabla 1. introducidos en el caso base para simulación. Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra el caso base llevado a PowerWorld (Ilustración 11)

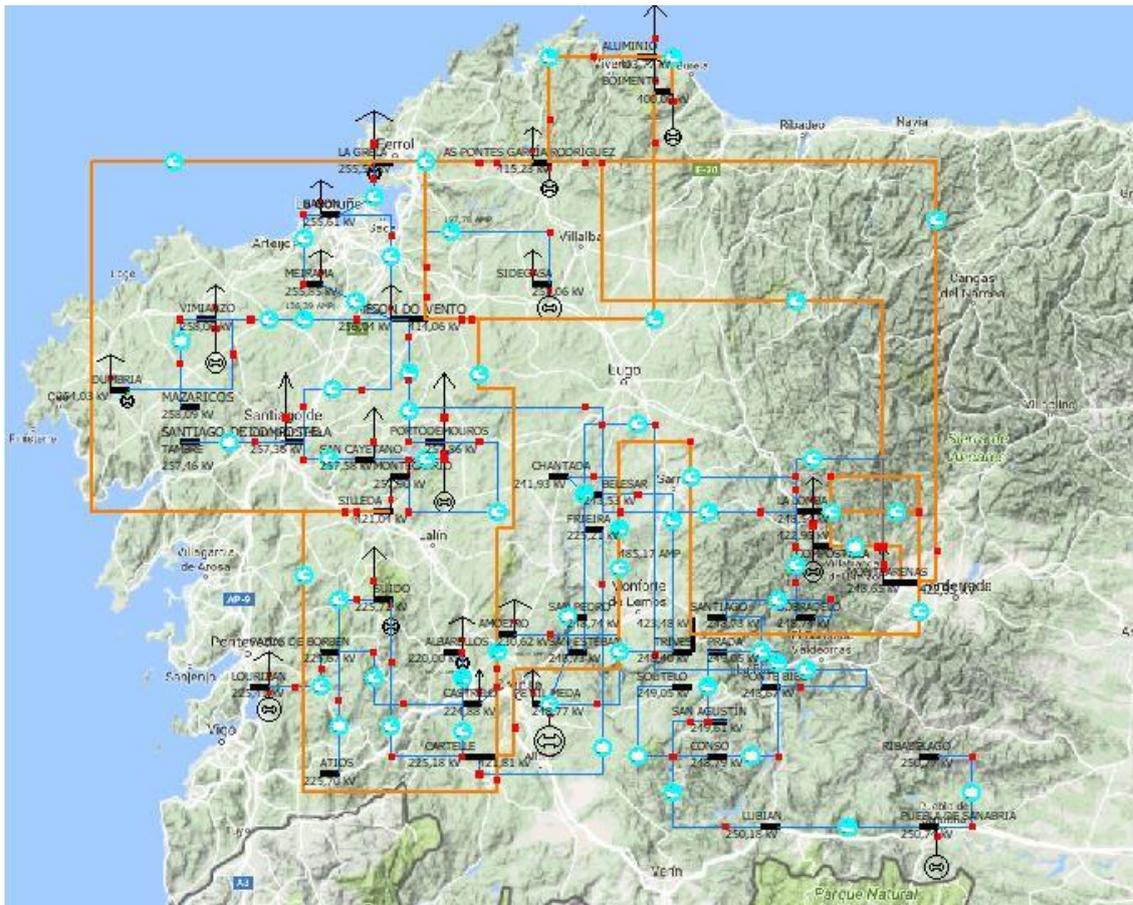


Ilustración 11. Modelo base elaborado para la simulación de la red. Fuente: elaboración propia

Para la realización del modelo base, se han tenido en cuenta los nudos anteriormente listados en la Tabla 1. El sistema final consta de 50 buses y 59 líneas de transporte de alta tensión.

A continuación se muestran los datos de las líneas introducidas en el caso base:

Desde	Desde	Hasta	Hasta	R	X	B	Lim MVA
11013	BOIMENTE	11005	ALUMINIO	0,00031	0,00311	0,0932	1190
11005	ALUMINIO	11055	AS PONTES	0,00081	0,00821	0,24709	1190
11013	BOIMENTE	11040	MESON	0,00177	0,01779	0,6088	1190
11038	SILLEDA	11015	CARTELLE	0,00144	0,01202	0,36697	1620
11040	MESON	11015	CARTELLE	0,00222	0,02152	0,65354	1500
11015	CARTELLE	11070	TRIVES	0,00135	0,01307	0,3861	1500
11020	COMPOSTILLA	11025	LA LOMBA	0,00012	0,00099	0,03821	1110
11020	COMPOSTILLA	11045	MONTEARENAS	0,0001	0,00126	0,04211	1110
11055	AS PONTES	11020	COMPOSTILLA	0,00289	0,02689	0,9302	1110
11045	MONTEARENAS	11025	LA LOMBA	0,00014	0,00109	0,04712	1110
11025	LA LOMBA	11070	TRIVES	0,00117	0,0119	0,39874	1510
11055	AS PONTES	11038	SILLEDA	0,00238	0,02105	0,73512	1620
11040	MESON	11055	AS PONTES	0,00099	0,01065	0,28966	1190
11055	AS PONTES	11045	MONTEARENAS	0,00289	0,02717	0,93968	950
21092	BORBEN	21003	ATIOS	0,0024	0,009	0,03419	290
21030	CASTRELO	21005	ALBARELLOS	0,00234	0,0123	0,0179	320
21011	AMOEIRO	21026	CHANTADA	0,00581	0,02906	0,05068	270
21030	CASTRELO	21011	AMOEIRO	0,00355	0,01881	0,0284	270
21026	CHANTADA	21020	BEESAR	0,00104	0,00407	0,01404	270
21020	BEESAR	21060	LA LOMBA	0,015	0,0823	0,16044	330
21075	MESON	21020	BEESAR	0,01268	0,07511	0,11086	270
21020	BEESAR	21215	TRIVES	0,0074	0,0415	0,06436	370
21075	MESON	21023	DUMBRIA	0,01048	0,05435	0,08488	290
21030	CASTRELO	21028	CARTELLE	0,00084	0,00558	0,01154	640
21028	CARTELLE	21053	FRIEIRA	0,0011	0,00927	0,02629	540
21199	SUIDO	21028	CARTELLE	0,00153	0,01498	0,04111	640
21092	BORBEN	21030	CASTRELO	0,00663	0,03864	0,06246	270
21095	PONTE BIBEY	21040	CONSO	0,00273	0,01815	0,04876	440
21040	CONSO	21198	SOUTELO	0,0003	0,0017	0,00281	426
21165	SABON	21056	LA GRELA	0,00134	0,00802	0,02612	285
21060	LA LOMBA	21085	MONTEA	0,0014	0,0078	0,01178	390
21060	LA LOMBA	21190	SOBRADELO	0,0042	0,0209	0,05832	400
21060	LA LOMBA	21215	TRIVES	0,008	0,0411	0,1157	330
21062	LOURIZAN	21092	BORBEN	0,00388	0,02125	0,03911	280
21063	LUBIAN	21127	SANABRIA	0,00456	0,02077	0,02982	240
21145	SAN AGUSTÍN	21063	LUBIAN	0,00418	0,01997	0,03022	250
21075	MESON	21070	MEIRAMA	0,003	0,0032	0,00885	610
21165	SABON	21070	MEIRAMA	0,0014	0,0144	0,03972	610
21075	MESON	21105	PORTO	0,00627	0,03714	0,05486	290
21075	MESON	21165	SABON	0,00365	0,02167	0,03178	320
21075	MESON	21175	SANT. COMP	0,00591	0,03068	0,046	630
21075	MESON	21183	SIDEGASA	0,00479	0,02547	0,03764	310

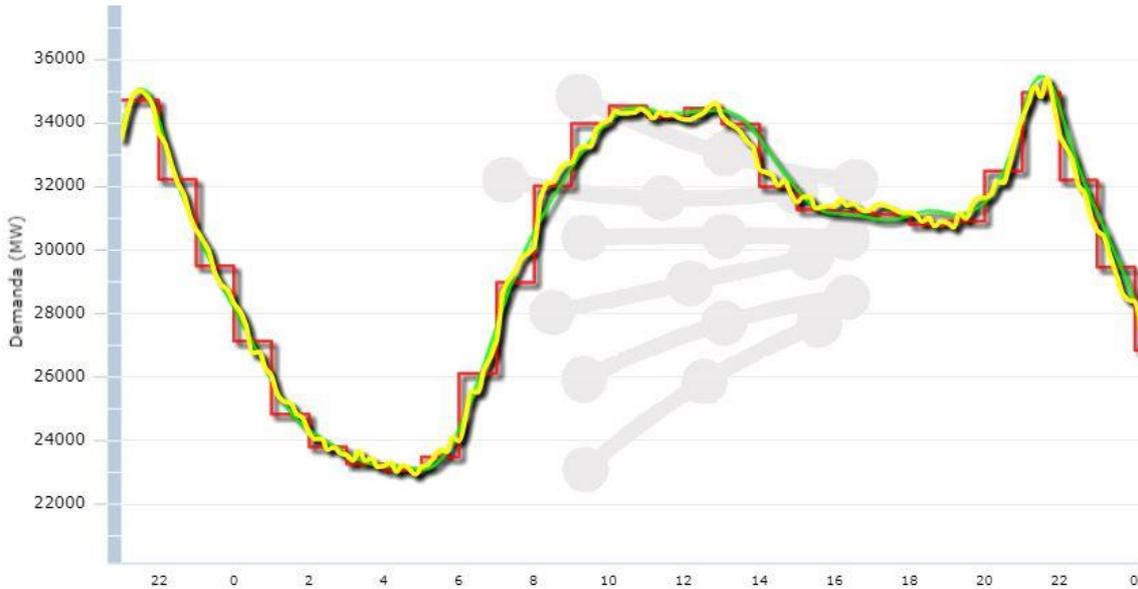
21075	MESON	21245	VIMIANZO	0,0047	0,03951	0,1145	689
21105	PORTO	21086	MONTECARRIO	0,002	0,015	0,016	310
21092	BORBEN	21199	SUIDO	0,00153	0,01498	0,04111	640
21095	PONTE BIBEY	21120	PRADA	0,0025	0,0141	0,02184	240
21095	PONTE BIBEY	21180	SANTIAGO	0,0019	0,0095	0,02605	400
21095	PONTE BIBEY	21215	TRIVES	0,00078	0,00547	0,01471	490
21146	SAN CAYETANO	21105	PORTO	0,01158	0,0259	0,26127	280
21120	PRADA	21145	SAN AGUSTÍN	0,0037	0,0172	0,02608	250
21123	PE SIL MEDA	21150	SAN ESTEBAN	0,00124	0,00541	0,01044	387
21215	TRIVES	21123	PE SIL MEDA	0,00484	0,02109	0,04068	387
21127	SANABRIA	21140	RIBADELAGO	0,00262	0,01182	0,01734	240
21175	SANT. COMP	21146	SAN CAYETANO	0,00091	0,00619	0,01691	290
21150	SAN ESTEBAN	21160	SAN PEDRO	0,0013	0,0057	0,01099	387
21215	TRIVES	21150	SAN ESTEBAN	0,0051	0,0223	0,043	387
21175	SANT. COMP	21202	TAMBRE	0,00398	0,02207	0,03725	290
21180	SANTIAGO	21190	SOBRADELO	0,002	0,0101	0,02724	400
21245	VIMIANZO	21250	MAZARICOS	0,00177	0,01488	0,04314	340

Tabla 2. Parámetros de las líneas eléctricas del modelo. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el anexo 3, en un principio se estudiaron más nudos y líneas de las finalmente introducidas. A partir de los mapas de la red [2], se podían sacar más nudos dentro de los límites de Galicia y también nudos en Asturias o Castilla y León que habría sido interesante estudiar para un resultado más fiable de la simulación. Finalmente, se han tenido que eliminar debido al límite de la versión del simulador utilizado. Para que los resultados no se vieran excesivamente afectados, se ha considerado que era mejor eliminar aquellos nudos de los que no se tuvieran ni carga ni generación, es decir, aquellos nudos que fueran solamente de transporte.

5. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha escogido para el estudio el día 17 de abril del año 2012, por contar con los datos de toda la red peninsular de ese día. Una vez obtenidos los archivos con los datos de la red para ese día, de los que contamos con un archivo de datos por cada hora, mediante la curva de demanda diaria (Ilustración 12), disponible en la web de la Red Eléctrica Española [2], podemos ver lo que podríamos esperar de la simulación. A partir de esa gráfica, cabría esperar resultados interesantes a las 22:00h, por ser el pico de demanda diario, a las 5:00 ó 6:00h por ser los momentos con menos demanda del día y a las 10:00h por ser punto de alta



Demanda (MW) a las 03:00 de 18/04/2012 **Real = 23261** **Prevista = 23057**

demanda diaria.

A continuación, podemos ver la generación diaria de energía eólica (Ilustración 13), disponible en la web de la Red Eléctrica Española [2]. De esta gráfica podemos concluir que las 18:00h es la hora a la que más energía eólica se produjo el día 17 de abril de 2012.

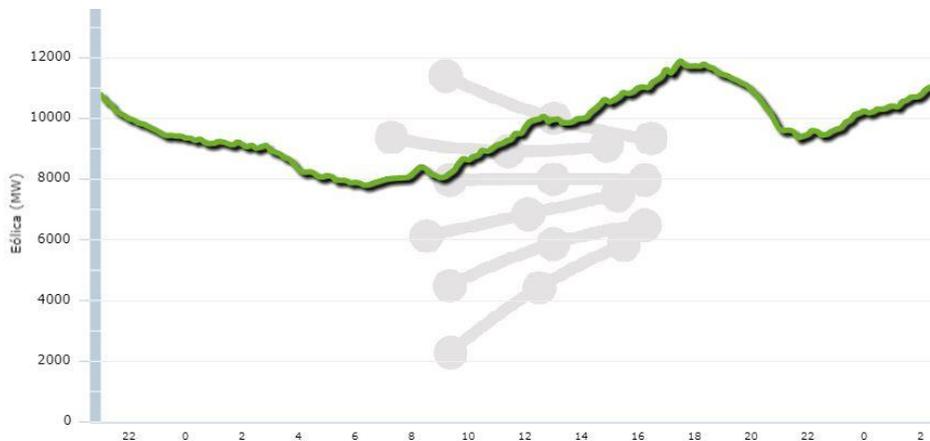


Ilustración 13. Curva diaria de generación eólica para el 17/04/2012. Fuente: [2]

Como ya he mencionado antes, Galicia no es un sistema aislado sino que contenía nudos que se unían mediante líneas a otros nudos situados fuera de sus límites. Por eso, se han intentado introducir, lo que llamaremos, nudos frontera. Para ello, hemos revisado los nudos que no han sido introducidos por salirse del límite de la comunidad autónoma de Galicia o por la imposibilidad de introducir más nudos en nuestra versión de PoweWorld. Una vez revisados esos nudos y teniendo los datos de su generación y carga a las distintas horas, pasamos a estudiar las líneas que unen los nudos que sí hemos introducido con los que no.

Nº NUDO	NUDOS NO INTRODUCIDOS	kV	CARGA NUDO		GENERACIÓN NUDO			
			MW	MVAR	MW	MVAR	LÍMITES (MVAR)	
21012	ADMEIRAM	220	0,031	0,72				
21050	CT. COMP	220	1,084	-4,337				
21127	PUERTO	220	14,26	0,085				
22127	LA MUDARRA	220			81	-14	-14	-14,4
11001	ADSILLED	400	-0,279	0,318				
11080	VILECHA	400	26,699	-1,367	38	-6,46	-6,46	-6,86

Tabla 3. Generación y carga de los nudos no introducidos en el caso base. Fuente: elaboración propia

ORIGEN		DESTINO		kV	DATOS DE LA LÍNEA			
NOMBRE	Nº	NOMBRE	Nº		R (pu)	X (pu)	B (pu)	Límite (MVA)
MESON	21075	PUERTO	21127	220	0,00362	0,02127	0,16113	290
MONTEARENAS	21085	CTCOMP	21050	220	0,0008	0,0042	0,00745	350
MEIRAM	21070	ADMEIRAM	21012	220	0,00158	0,00272	0,00407	111
SANABRIA	21170	MUDARRA	22127	220	0,02814	0,12681	0,18646	240
SILLEDA	11038	ADSILLED	11001	400	0,00004	0,00005	0,03716	300
LA LOMBA	11025	VILECHA	11080	400	0,0017	0,01551	0,57831	1110

Tabla 4. Parámetros de las líneas que unen los nudos introducidos en el caso base con los que no. Fuente: elaboración propia

Con estos datos, hemos asignado lo que llamaremos nudos frontera. En nuestro caso, los nudos frontera serán:

- Mesón Do Vento
- Meirama
- Montearenas
- Puebla de Sanabria
- Silleda
- La Lomba

Se ha decidido que sean estos los nudos frontera por ser aquellos a los que se unían los nudos no introducidos más importantes en cuanto a datos de generación y carga.

Lo que hemos hecho ha sido introducir en ellos la carga y generación de los nudos no introducidos a los que llevaban. Esta aproximación no es del todo correcta. Para que lo fuera deberíamos simular el caso introduciendo esos nudos y líneas y ver las potencias resultantes de dicha simulación. Como eso no lo podemos hacer, hacemos esta aproximación. En nuestro caso en concreto, ninguno de los nudos frontera tenían en un principio carga o generación por lo que hemos podido añadir los datos de los nudos no introducidos directamente, sin interferir con otras cargas o generadores que pudieran tener.

5.1 SIMULACIÓN SIN MODIFICAR GENERACIÓN

A partir de los archivos obtenidos de la Red Eléctrica de España [2], se ha procedido a recopilar los valores de cargas y generaciones en los buses tomados para la realización del modelo, las 24 horas del día, y se han elaborado tablas con los valores obtenidos (Anexo 3). Estos valores los hemos introducido en el simulador de la manera que ya he explicado para poder hacer la simulación.

Al simularlo todo podemos ver si el sistema trabaja con normalidad. En mi caso hay horas a las que las líneas se sobrecargan más que otras pero el sistema no llega en ningún caso a la situación de "Blackout"; por tanto, sigue en funcionamiento.

Para hacer una simulación fiel a los datos que hemos recogido, usamos la herramienta del PowerWorld llamada Time Step Simulation, como ya se ha descrito anteriormente. Esta herramienta funciona de forma que se puede observar cómo van variando las distintas magnitudes conforme pasa el tiempo directamente en el dibujo. Así podemos ver gráficamente cómo se van saturando más o menos las líneas en cada momento. También nos da la posibilidad de mostrar en tablas los resultados que nos puedan resultar más interesantes.

En nuestro caso, un dato muy interesante sería el de las pérdidas en las líneas.

	PÉRDIDAS LÍNEAS (MW)	PÉRDIDAS LÍNEAS (MVAR)
1:00	18,79	-836,79
2:00	12,16	-819,97
3:00	12,13	-821,29
4:00	12,23	-819,54
5:00	11,69	-823,1
6:00	155,48	-20,94
7:00	34,6	-738,18
8:00	11,4	-819,65
9:00	37,74	-714,27
10:00	42,13	-659,54
11:00	51,21	-582,53
12:00	53,07	-579,07
13:00	48,29	-617,58
14:00	50,12	-600,14
15:00	15,17	-804,31
16:00	15,52	-803,37
17:00	15,51	-797,3
18:00	16,25	-795,75
19:00	15,65	-798,83
20:00	15,01	-801,64
21:00	14,17	-805,94
22:00	31,4	-732,71

23:00	33,41	-721,52
0:00	12,81	-810,93

Tabla 5. Resultados de pérdidas de las líneas sin modificar generación. Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en la tabla anterior y en la gráfica que se muestra a continuación (Ilustración 14), a las 06:00h se produce un pico muy importante. Este dato resulta curioso porque no parece, a simple vista, que sea una hora a la que hay mucha actividad. Esto puede ser debido a:

- Puede ser un error del fichero de datos proporcionado por la Red Eléctrica de España [2].
- Como hemos visto en la Ilustración 5, las 06:00h es la hora a la que menos generación eólica existe. Este hecho puede haber implicado que se trastocó el funcionamiento del sistema.
- A pesar de que pueda parecer que las 06:00h es una hora a la que hay más proporción de gente durmiendo que despierta, los nudos de transporte de potencia siguen funcionando.
- Galicia posee condiciones extraordinarias para abordar experiencias de calidad de vida debido a su configuración demográfica, clima, paisaje y existencia de actividades con gran potencialidad. Además, Galicia es la primera productora de madera de España [7]. Eso, unido a industrias de automoción pueden ser causa de estas pérdidas a las 06:00h ya que son empresas que no podrán parar de trabajar y, por tanto, estarán en funcionamiento a esas horas.

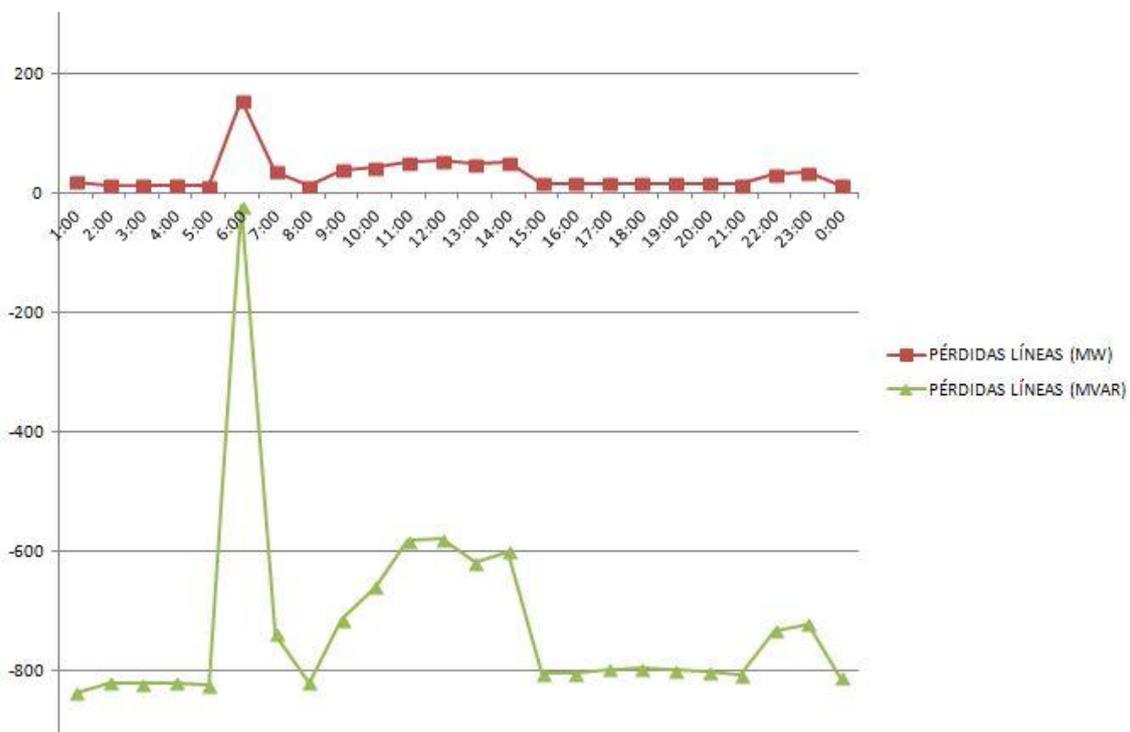


Ilustración 14. Resultados de pérdidas de las líneas sin modificar generación. Fuente: Elaboración propia

Este pico también lo notamos en la simulación de PowerWorld. Al realizarla y poder verla gráficamente, a las 06:00h observamos una saturación de líneas por encima del resto (Ilustración 7). Ese problema de saturación se va arrastrando las 6 horas posteriores ya que el sistema no es capaz de asimilar el problema y solucionarlo en la misma hora. Se está produciendo más energía de la que el sistema puede distribuir y, por tanto, hasta que no consiga distribuir todo ese exceso, no vuelve a funcionar con normalidad.

Aparte del pico ya mencionado, cabe destacar una subida en las pérdidas de las líneas de 10.00h a 14.00h y de 22:00h a 00:00h. Estos datos resultan más coherentes ya que son las horas de más actividad durante el día. La zona de la mañana coincide con el horario de más actividad laboral y en casa y la zona de la noche coincide con el horario de más actividad en casa.

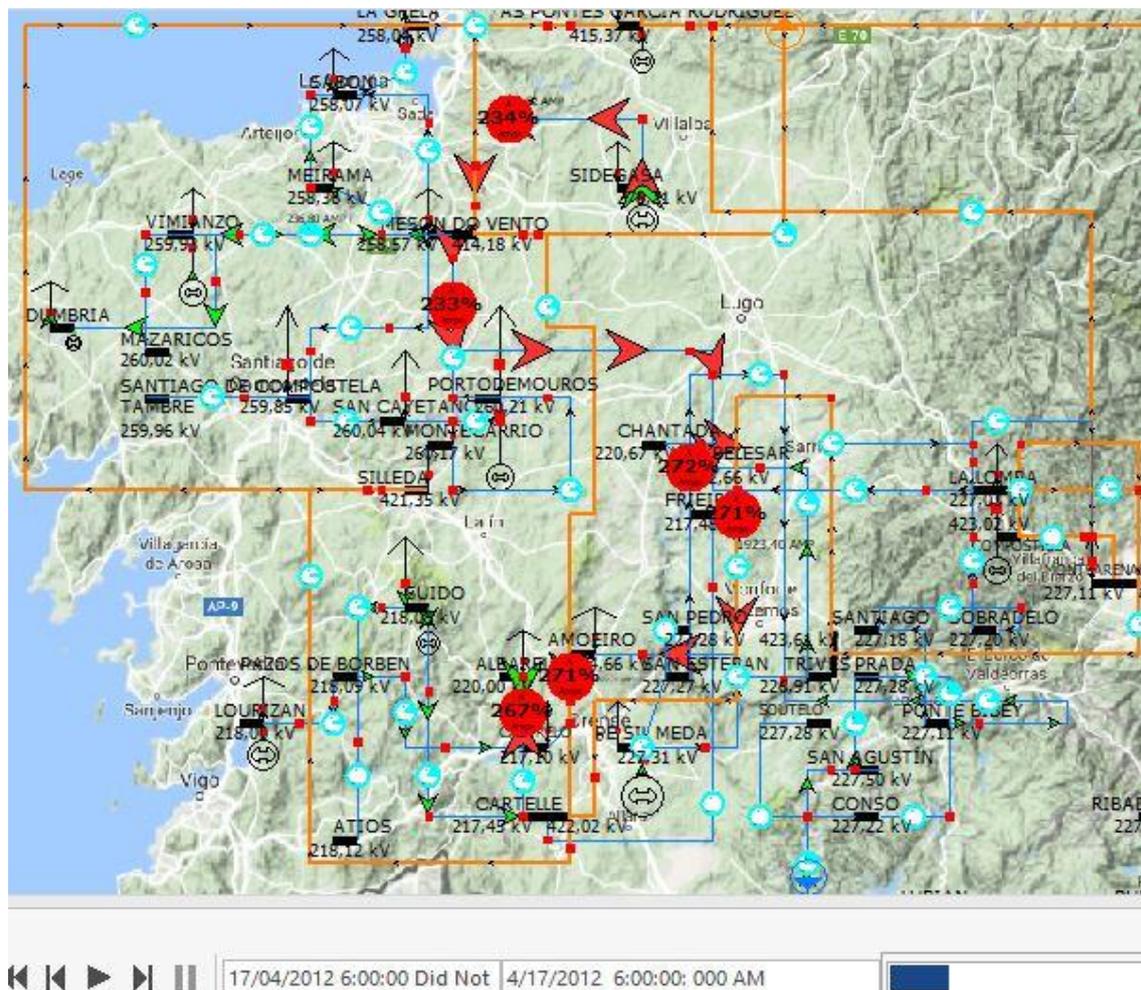


Ilustración 15. Simulación del caso base a las 06:00h. Fuente: elaboración propia

Para entender la ilustración 15, es necesario saber que los círculos indican la saturación de las líneas. Si están de color azul implica que no hay saturación, si es de color rojo implica una saturación por encima del 100% de su límite. Las flechas verdes nos indican la magnitud de la potencia que circula por las líneas. Si las flechas son grandes implica que hay más potencia. En este caso vemos flechas rojas porque las líneas están sobrecargadas.

5.2 SIMULACIÓN CON INCREMENTO DE GENERACIÓN

Finalmente, llega el momento de aumentar la generación eólica de los nudos que hemos nombrado anteriormente. Este aumento nos va a permitir observar hasta qué punto se podría aumentar la generación de los nudos si fuera posible. Este es el objetivo final del estudio y el punto que da nombre a este trabajo.

Para llevar a cabo este proceso hay que hacer lo indicado en el punto 3.4 de este documento. Se ha ido aumentando la generación en los nudos de Vimianzo, As Pontes de García Rodríguez, Sidegasa y Porto Do Mouros por separado para, finalmente, ver a qué potencia podrían trabajar sin complicación aparente todos los nudos a la vez.

A pesar de tener datos de los nudos en las 24 horas del día, para este apartado en concreto de aumento de generación, se ha decidido hacerlo solo a 3 horas para que el modelo no se volviera excesivamente complicado.

Después de haber estado experimentando en los tres casos con cada bus elegido por separado, se han obtenido los siguientes resultados:

BUS	LÍMITE GENERACIÓN (MW) 05:00h	LÍMITE GENERACIÓN (MW) 13:00h	LÍMITE GENERACIÓN (MW) 00:00h
VIMIANZO	400	430	460
AS PONTES DE GARCÍA RODRÍGUEZ	7000	7300	7000
SIDEGASA	490	480	500
PORTO DO MOUROS	450	350	470

Tabla 6. Resultados de generaciones técnicamente posibles por separado. Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos en las 3 horas a las que se ha hecho el estudio son bastante similares, es decir, no hay diferencias muy grandes entre el límite de generación de un mismo nudo a las distintas horas. Si se hubiera obtenido una diferencia grande entre los casos, habría sido necesario estudiar más horas, para ver en qué momento se producía ese cambio. Sería difícil poder aumentar la generación de nudos tanto porque, en la vida real, el límite habría que marcarlo teniendo en cuenta otros factores.

Después de averiguar el límite, se ha intentado hacer la simulación con el 100% de los valores recogidos en la Tabla 6 pero se producía "Blackout".

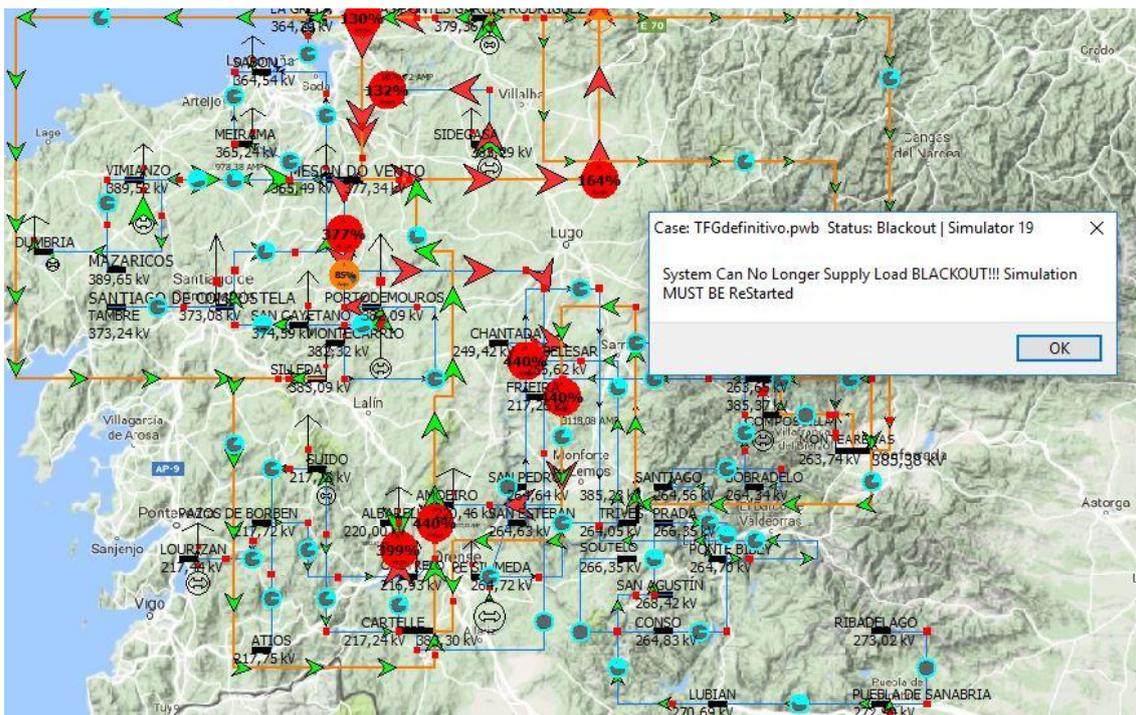


Ilustración 16. Simulación del caso aumentando la generación de los nudos hasta el límite de su generación. Fuente: elaboración propia

Como la simulación dejaba de funcionar si los nudos trabajaban al 100%, hemos ido bajando ese porcentaje hasta que se ha encontrado un punto en el que el modelo trabaja adecuadamente.

BUS	Generación existente en nudo (MW)			Generación con aumento en nudo (MW)		
	05:00h	13:00h	0:00	05:00h	13:00h	0:00
VIMIANZO	49	92	71	160	172	184
AS PONTES DE GARCÍA RODRÍGUEZ	16	24	21	2800	2920	2800
SIDEGASA	70	112	85	196	192	200
PORTO DO MOUROS	11	20	15	180	140	188

Tabla 7. Valores añadidos a las generaciones existentes. Fuente: Elaboración propia

Los valores recogidos en la tabla anterior corresponden al 40% de la generación máxima que habíamos probado que existía en cada nudo por separado. Estos valores, a pesar de ser el 40% del límite, siguen siendo un aumento de la generación bastante importante.

Para acabar con el estudio, metemos estos datos en el estudio por horas y simulamos. El sistema se comporta con normalidad, sin producirse saturaciones importantes en ningún punto. Ahora tenemos que ver cómo se comporta realmente el sistema y, para ello, vemos los resultados de pérdidas y comparamos con lo obtenido sin generación.

	SUMA MW LOSS CON GENERACIÓN	SUMA MVAR LOSS CON GENERACIÓN	SUMA MW LOSS SIN GENERACIÓN	SUMA MVAR LOSS SIN GENERACIÓN
5:00	97,86	-98,39	11,69	-823,1
13:00	90,61	-112,69	48,29	-617,58
0:00	100,46	-79,25	12,81	-810,93

Tabla 8. Comparación de los resultados de pérdidas y saturación de las líneas modificando generación. Fuente: Elaboración propia

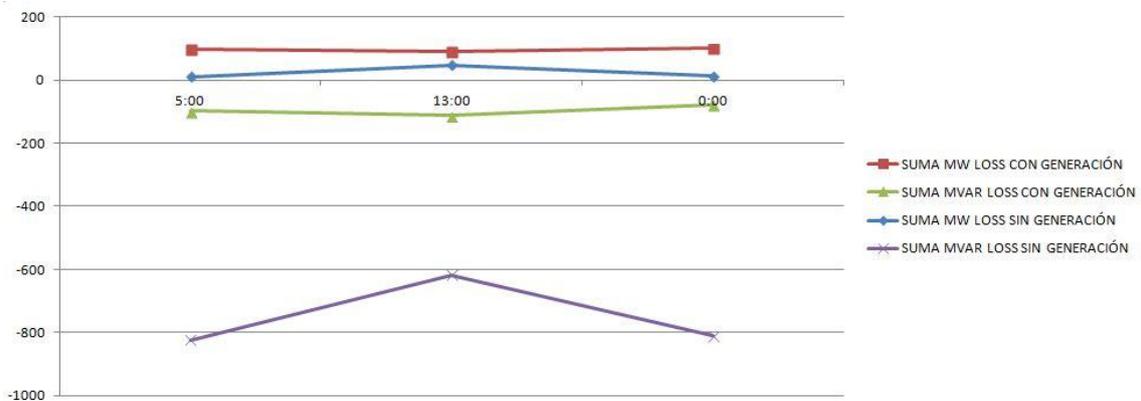


Ilustración 17. Comparación de los resultados de pérdidas y saturación de las líneas modificando generación. Fuente: Elaboración propia

Considerando que la generación en este caso es mucho mayor, se esperaría que las pérdidas fuesen mayores y, como se ve a partir de los resultados, así ha sido. La potencia depende del cuadrado de la intensidad y de la resistencia pertinente:

$$P = I^2 \cdot R$$

A partir de esa fórmula se podría ver que los resultados tienen sentido, ya que cuanto mayor sea la potencia transportada, mucho mayor será la intensidad que circula por las líneas y, por tanto, serán mayores las pérdidas.

6. CONCLUSIONES

Analizando los objetivos planteados al principio del trabajo, se puede decir que se han cumplido:

- Determinar, aproximadamente, la red eléctrica de alta tensión de Galicia. Gracias a los mapas de transporte ofrecidos por la Red Eléctrica de España, pude ir localizando todos los nudos de Galicia de 400 y 220 kV. A pesar de que estos mapas ofrecían más cantidad de nudos y líneas, la aproximación que se ha hecho es bastante fiel a la realidad.
- Obtener los datos aproximados de generación y consumo de Galicia. A partir de los archivos de datos que se encontraron, he sido capaz de recopilar todos los datos de generación y carga de los nudos. Había muchos nudos de los que no se encontraban estos datos pero esto es debido, en su mayoría, a que eran nudos de transporte.
- Modelizar un caso base y simularlo considerando la generación actual. Con los datos mencionados anteriormente, he conseguido crear el caso base en el programa PowerWorld. A partir de ahí, he logrado simular el comportamiento de este caso las 24 horas del día para poder ver gráficamente cómo varían los parámetros de la red.
- Plantear casos considerando un aumento en la generación basada en fuentes renovables. Una vez hecha la simulación sin hacer cambios, se ha considerado un aumento en la generación de 4 nudos favorables para ello. Este paso nos ha servido para ver cuánto se podría aumentar la energía eléctrica que circula por el modelo a partir del aumento de energía eólica.
- Estudiar los resultados obtenidos y plantear soluciones en los casos de saturación de líneas. Se han estudiado las pérdidas del caso base sin modificaciones y cómo, aumentando la generación gracias a la energía renovable, aumentan las pérdidas en el sistema.

Se puede comprobar que todos los objetivos marcados al inicio del trabajo en la introducción se han cumplido y han sido estudiados en profundidad. Se han explicado todos los conceptos adecuadamente para que cualquier persona ajena al trabajo pueda entenderlo a la perfección. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados en cualquier momento para comparar con datos de otros años, si se encontraran, o para realizar estudios más detallados sobre el tema.

A la vista de los resultados del Estudio del efecto de aumentar la penetración de generación renovable en la red de transporte, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- En este caso, se ha hecho un aumento de la generación eólica en 4 nudos a la vez pero, como hemos visto, se podía aumentar la potencia bastante por encima de lo marcado por los datos. Por tanto, se podría haber estudiado el aumento de esta generación en más nudos y ver cómo esto influía en los resultados de la red.
- A pesar de que el modelo simplificado puede resultar más simple en comparación con la red real tiene bastante complicación porque el sistema se satura con mucha más facilidad debido a que no tiene las líneas necesarias para distribuir toda la energía generada y los consumos reales de los nudos introducidos no engloban muchos otros

que, por limitaciones, no se han podido introducir.

Para finalizar, como reflexión personal, diré que ha sido muy interesante realizar este trabajo para finalizar mis estudios de grado de tecnologías industriales. Este tema solo lo había tratado en la asignatura de Sistemas Eléctricos de Potencia pero con mucho menos detalle. Es gratificante ver cómo, con el paso del tiempo, pasas de no saber cómo plantear el estudio a saber resolverlo todo; gracias, no solo a lo tratado en este estudio, sino a todo lo aprendido durante la duración de este grado, como puede ser búsqueda de información, elaboración de tablas y manejo de programas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Datos sobre la generación de energía en Galicia: Instituto Energético de Galicia, « <http://www.inega.gal> », [En línea]. Disponible: http://www.inega.gal/descargas/publicaciones/78Energias_Renovables_en_Galicia.pdf/
- [2] Mapas eléctricos de la red, gráficas de demanda diaria de energía y generación eólica diaria: Red Eléctrica de España, S.A.U., «www.ree.es», [En línea]
- [3] Atlas Eólico de España, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE, www.atlaseolico.idae.es, [En línea]
- [4] PowerWorld Corporation, «PowerWorld SimulatorVersion19», 2016
- [5] © Google, «Google Maps», 2017
- [6] Manual de referencia parámetros de red
- [7] Datos de empresas de Galicia: «<http://www.galicia.es>», [En línea]. Disponible: <http://www.galicia.es/es/economia>

ANEXOS

