

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Gestión óptima de redes híbridas mediante enlaces
de continua

Autor: Javier Longobardo Dueñas

Tutor: Manuel Barragan Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería en tecnologías Industriales

Gestión óptima de redes híbridas mediante enlaces de continua

Autor:

Javier Longobardo Dueñas

Tutor:

Manuel Barragan Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

Profesor Titular de Universidad

Profesor Titular de Universidad

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Gestión óptima de redes híbridas mediante enlaces de continua

Autor: Javier Longobardo Dueñas

Tutor: Manuel Barragan Villarejo
Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia y amigos

Javier Longobardo Dueñas

Sevilla, 2023

Resumen

Actualmente, con la integración de energías renovables la disposición de la red tal y como se conoce está cambiando. El consumidor ya no es una simple carga a la cual hay que alimentar, sino que con la integración de estas nuevas tecnologías además de satisfacer su consumo, está también inyectando potencia a la red. El problema que se podría plantear es si la red como se conoce actualmente estaría preparada para esta demanda masiva por parte del consumidor, y por consiguiente, la incertidumbre en saber si es factible modificar la disposición actual para poder responder a esta demanda. Por eso, el presente trabajo consiste en la integración de una línea de continua a través del mallado de una línea de alterna. Para ello se une dos nudos de una red genérica a través de dos convertidores y una línea de continua, para así quedar mallada y se tienen dos tipos de flujo de potencia: alterna y continua.

Para ello, se ha realizado el modelo matemático basado en una red genérica radial a la cual se le ha ido incorporando sucesivas mejoras a través del mallado del sistema y se le ha aplicado un flujo de cargas y *Optimal power flow* siendo la función objetivo reducir la potencia del nudo *slack*, lo que es directamente proporcional a reducir las pérdidas para así obtener una red más eficiente.

Primero, se ha escogido una red de pequeña escala de 4 nudos, que se le ha ido implementado el modelo matemático previamente mencionado y simulando 5 intervalos de tiempo. A través del caso radial (caso que se escoge como base), se irán analizando los modelos y sus mejoras a través de un mallado que servirá como un camino alternativo para hacer fluir la potencia. Para ver las mejoras de la red, se analizarán parámetros interesantes en nuestro modelo como serían: el nudo con sobretensión, el nudo con subtensión, la intensidad por la rama más sobrecargada...

Una vez obtenidos los datos para la red de pequeña escala, se extrapola este estudio para una red real, con doce nudos y se tendrá un día entero para analizar los datos. Primero, se comenzará analizando el caso radial, seguido del back to back (red ideal sin pérdidas). Posteriormente se le añadirán las pérdidas y finalizará el análisis con el modelado de la línea de continua. Siguiendo esta filosofía se tratará de ver cómo evolucionan las variables de nuestro sistema y cómo afecta el mallado a los parámetros de estudio.

La implantación de las redes híbridas va a jugar un papel fundamental en los próximos años debido a que se está apostando fuertemente por la integración de la energía solar fotovoltaica, la integración de puestos de carga para coches eléctricos y sistemas de almacenamiento. Por eso en este proyecto, se da cabida a la implantación de la potencia continua en la red alterna y así flexibilizar la red tal y como se conoce actualmente y así sacar un máximo rendimiento de ella.

Abstract

Today, with the integration of renewable energies, the layout of the grid as we know it is changing. The consumer is no longer a simple load to be fed, but with the integration of these new technologies, in addition to satisfying their consumption, they are also injecting power into the grid. The problem that could arise is whether the grid as it is currently known would be prepared for this massive demand from the consumer, and therefore the uncertainty as to whether it is feasible to modify the current layout to be able to respond to this demand. Therefore, the present work consists of the integration of a direct current line through the meshing of an alternating current line. To do this, two nodes of a generic network are connected by means of two converters and a DC line, so that it is meshed and there are two types of power flow: AC and DC.

To this end, a mathematical model has been created based on a generic radial network to which successive improvements have been incorporated through the meshing of the system and a load flow and Optimal power flow have been applied, the objective function being to reduce the power of the slack node, which is directly proportional to reducing losses in order to obtain a more efficient network.

First, a small-scale network of 4 nodes has been chosen and the previously mentioned mathematical model has been implemented and 5 time slots have been simulated. Through the radial case (the case chosen as a base), the models and their improvements will be analysed by means of a mesh that will serve as an alternative path to make the power flow. To see the improvements in the network, interesting parameters will be analysed in our model, such as: the overvoltage node, the undervoltage node, the intensity of the most overloaded branch.....

Once the data for the small-scale network has been obtained, this study is extrapolated to a real network, with twelve nodes, and we will have a whole day to analyse the data. First, we will start by analysing the radial case, followed by the back to back (ideal network without losses). Then the losses will be added and the analysis will end with the modelling of the continuous line. Following this philosophy, we will try to see how the variables of our system evolve and how the meshing affects the study parameters.

The implementation of hybrid grids will play a fundamental role in the coming years due to the strong commitment to the integration of photovoltaic solar energy, the integration of charging stations for electric cars and storage systems. For this reason, in this project, the implementation of continuous power in the alternating grid will be accommodated in order to make the grid as we currently know it more flexible and thus obtain maximum performance from it.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xv
Índice de Ilustraciones	xvi
Notación	xviii
1 Introducción	1
2 Modelo de la red de BT para flujo de carga	11
2.1. <i>Radial Simple</i>	11
2.2. <i>Modelo Back to Back</i>	12
2.3. <i>Modelo Back to Back más pérdidas</i>	14
2.4. <i>Modelo con línea DC</i>	16
2.5. <i>Modelo con generación intermedia en la línea DC</i>	17
3 Validación en Red pequeña escala	19
3.1 <i>Descripción de la red</i>	19
3.2 Comparación de los resultados	21
4 Validación modelo Red Real	31
4.1 <i>Descripción de la red real</i>	31
4.2 <i>Análisis de los resultados</i>	34
4.2.1 Modelo con línea intermedia	46
5 Conclusiones	58
Referencias	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la red modelo.	19
Tabla 2. Variable objetivo a minimizar red escala.	26
Tabla 3. Parámetros de la red de estudio.	31
Tabla 4. Variable objetivo a minimizar red real.	40
Tabla 5. Variable objetivo a minimizar red real nudo intermedio.	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución del precio de la luz año 2021. (OMIE, 2022)	1
Ilustración 2. Evolución del precio de la luz año 2022.	2
Ilustración 3. Listas de incentivos económicos. (BOE, 2022)	2
Ilustración 4. Evolución de la potencia instalada en España. (Canales sectoriales, 2022)	3
Ilustración 5. Matriculación de coches eléctricos. (Orus, 2023)	4
Ilustración 6. Esquema equivalente monofásico red radial de n nudos.	11
Ilustración 7. Esquema equivalente monofásico Back to Back red de n nudos.	12
Ilustración 8. Esquema monofásico Back to Back mas pérdidas red de n nudos.	14
Ilustración 9. Esquema monofásico línea DC.	16
Ilustración 10. Esquema monofásico nudo intermedio en continua.	17
Ilustración 11. Esquema monofásico equivalente monofásico red radial.	19
Ilustración 12. Esquema equivalente monofásico rectificador más VSC ideal.	20
Ilustración 13. Esquema equivalente monofásico rectificador más VSC con filtro.	20
Ilustración 14. Esquema monofásico modelo doble VSC.	21
Ilustración 15. Evolución de la potencia activa en las cargas.	22
Ilustración 16. Evolución de la potencia reactiva en las cargas.	22
Ilustración 17. Evolución del punto con menor tensión.	23
Ilustración 18. Evolución del punto con mayor tensión.	24
Ilustración 19. Evolución de la potencia aportada por el generador.	25
Ilustración 20. Potencia absorbida por el convertidor de cabecera.	26
Ilustración 21. Potencia activa inyectada por el convertidor de cola.	28
Ilustración 22. Reactiva aportada por los convertidores.	29
Ilustración 23. Evolución de la intensidad.	30
Ilustración 24. Esquema equivalente monofásico de la red real BT.	31
Ilustración 25. Esquema equivalente monofásico modelando formación back to back.	32
Ilustración 26. Esquema equivalente monofásico modelando formación back to back más pérdidas.	33
Ilustración 27 Esquema equivalente monofásico formación back to back más línea DC.	33
Ilustración 28. Esquema equivalente monofásico formación back to back inyección intermedia.	34
Ilustración 29 Perfil de activa generación o consumo.	35
Ilustración 30. Evolución de la potencia reactiva en las cargas.	36
Ilustración 31 Evolución de la tensión del nudo 11.	37
Ilustración 32. Evolución de la tensión del nudo 8.	38
Ilustración 33. Evolución de la potencia aportada por el generador.	39
Ilustración 34. Evolución de la potencia del convertidor de cabecera.	41

Ilustración 35. Evolución de la potencia activa del convertidor de cola.	42
Ilustración 36. Evolucion de la potencia reactiva convertidor de cabecera.	43
Ilustración 37. Evolucion de la potencia reactiva convertidor cola.	44
Ilustración 38. Evolución de la intensidad de la rama más sobrecargada.	45
Ilustración 39. Evolución de la tensión del nudo 11 modelo nudo intermedio.	47
Ilustración 40. Evolución del nudo 8 modelo nudo intermedio.	48
Ilustración 41. Evolución de la potencia aportada por el nudo <i>slack</i> modelo nudo intermedio.	49
Ilustración 42. Evolución de la potencia del convertidor de cabecera modelo nudo intermedio.	50
Ilustración 43. Evolución de la potencia activa del convertidor de cola modelo nudo intermedio.	51
Ilustración 44. Evolución de la potencia reactiva convertidor de cabecera modelo nudo intermedio.	52
Ilustración 45. Evolución de la potencia reactiva convertidor de cola modelo nudo intermedio.	53
Ilustración 46. Evolución de la Intensidad de la rama más sobrecargada modelo nudo intermedio.	54
Ilustración 47. Evolución de la tensión rama 7-14 modelo DC.	55
Ilustración 48. Evolución intensidad rama 7-14 DC intermedia modelo nudo intermedio.	56

Notación

$G(i,j)$	Matriz de Conductancias
$B(i,j)$	Matriz de Susceptancias
VSC	Convertidor de fuente controlada
$R(i,j)$	Matriz de resistencias
<i>OPF</i>	Optimal Power Flow
θ_i	Ángulo de fase del nudo i
I _{Re}	Parte real
I _{Im}	Parte imaginaria
sen	Función seno
cos	Función coseno
P _g	Potencia activa aportada por el generador
Q _g	Potencia reactiva aportada por el generador
HVDC	High Voltage Direct Current
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
VSC	Voltage Source Converter
B2B	Back to Back
B2BP	Back to Back más Pérdidas
B2BPDC	Back to Back más Pérdidas de continua

1 INTRODUCCIÓN

La idea principal desarrollada en este trabajo es darle soporte y flexibilidad a la integración de las redes híbridas en las redes de baja tensión para facilitar la integración de nuevas formas de integración de recursos energéticos distribuidos como generación fotovoltaica, sistemas de almacenamiento de energía, puntos de recarga eléctrica. Dicho esto, la red de baja tensión mejora su eficiencia ante la presencia masiva de estos recursos.

1.1 Introducción histórica

1.1.1) Evolución energética

Tras la devaluación económica sufrida en los anteriores años debido a la crisis del COVID y la reciente guerra de Ucrania, está en boca de todos el impacto económico que está sufriendo la población a nivel mundial debido a la crisis energética. Como consecuencia a la serie de sanciones impuestas al gas, los gobiernos están desarrollando una serie de ayudas que se resumen en incentivos económicos para favorecer las energías alternativas, para así suplir la forma de energía convencional y combatir de dicha manera la subida del precio de la energía (Islasolar, 2022).

omie Informe anual - 2021 - 1. Mercado diario

1.1 Precios máximo, mínimo y medio aritmético en el mercado diario

En España

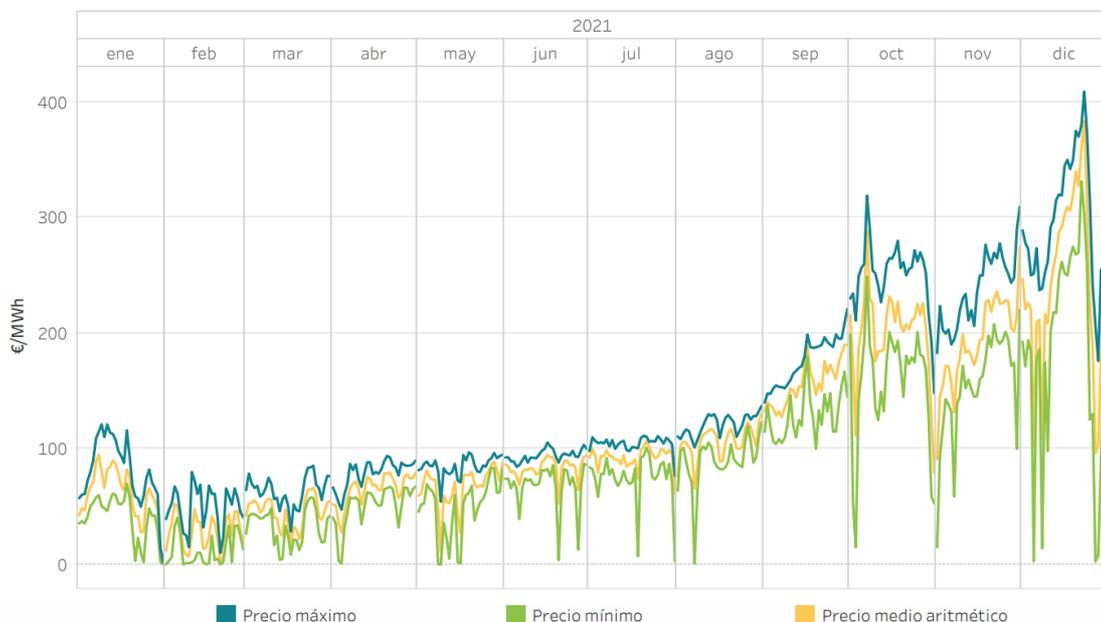


Ilustración 1. Evolución del precio de la luz año 2021. (OMIE, 2022)

Como se puede observar en la imagen superior, se recoge a nivel mensual el precio del megavatio hora durante el año 2021. Se puede apreciar que de enero a febrero hay una ligera disminución del precio, pero a partir del segundo mes hay una ligera subida del precio que se acrecenta aun mas en los meses de verano, cuando alcanza precios históricos de 300 euros el megavatio hora. Dicha subida culmina alcanzando un nuevo máximo histórico en diciembre, alcanzando un valor cercano a los 400 euros el megavatio hora.

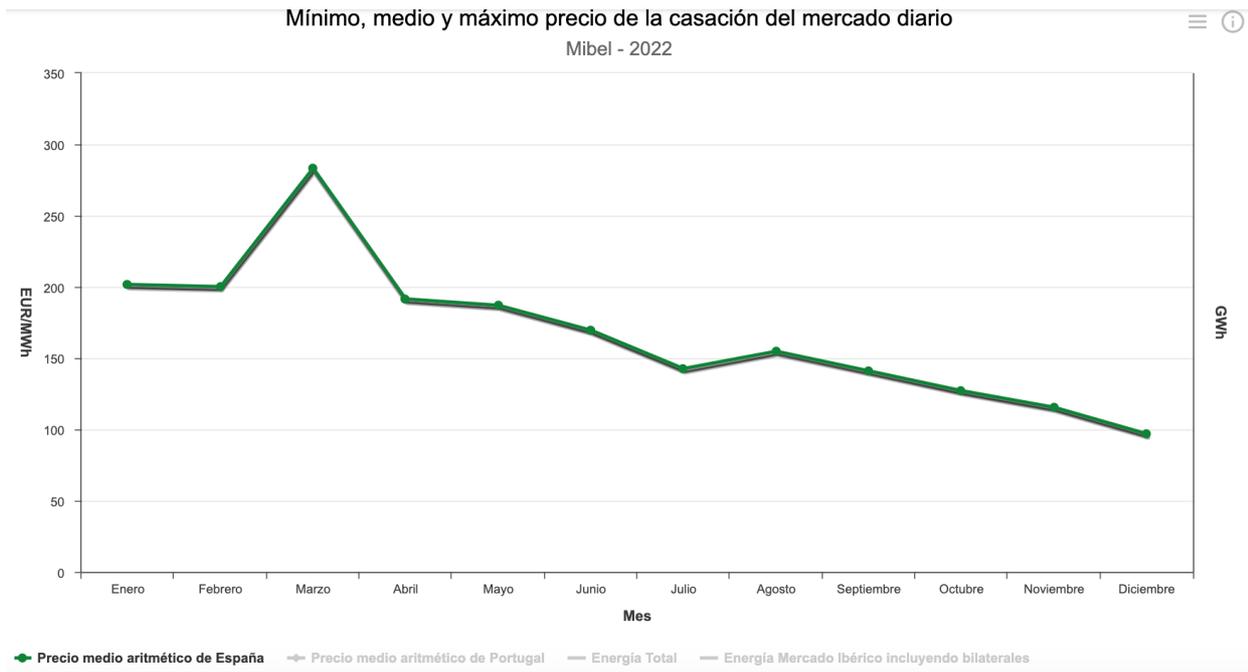


Ilustración 2. Evolución del precio de la luz año 2022.

Como se muestra en la ilustración 2, se realiza un análisis de la evaluación del precio de la luz mensual durante el año 2022. En el mes de enero se puede observar que apenas hay variación, se mantiene constante, mientras que febrero sufre el máximo valor anual alcanzando casi los 300 euros el megavatio hora, pero en líneas generales el precio de la energía va disminuyendo linealmente hasta cerrar el año con un precio en torno a los 100 euros el megavatio hora, este periodo coincide con la serie de medidas impuestas por Europa a Rusia tras la invasión de Ucrania. Esto produjo un encarecimiento del precio del gas y del precio de la luz en países que dependían en mayor lugar del gas ruso, España solo importaba un 9%, por eso en la ilustración 2, a principios de años dicha subida no es tan brusca (Iglesias, s.f.).

Comparado con el año 2021, el 2022 ha sido bastante bueno ya que se ha combatido la tendencia alcista del precio de la energía con la que se acabó el año 2021. Este análisis es muy interesante desde el punto de vista de nuestro proyecto, ya que empleando las energías alternativas y haciendo un uso adecuado de la explotación de la red, se puede combatir la fluctuación del precio de la energía como se ha hablado anteriormente.

1.1.2) Solución fotovoltaica

Dicho esto, para abaratar el precio de la facturación de la luz, se han ido aportando una serie de soluciones en forma de incentivos económicos para fomentar el autoconsumo de energía renovables en hogares para así combatir las fluctuaciones que sufre el precio de la luz, y también para no depender de las fuentes de energía tradicionales, gas, petróleo, gas natural...

Sector residencial:

Actuaciones de generación	Módulo generación [Ayuda (€/kW)]	Módulo generación Autoconsumo colectivo [Ayuda (€/kW)]
Instalación Fotovoltaica autoconsumo (1.000 kWp < P ≤ 5.000 kWp).	300	355
Instalación Fotovoltaica autoconsumo (100 kWp < P ≤ 1.000 kWp).	350	420
Instalación Fotovoltaica autoconsumo (10 kWp < P ≤ 100 kWp).	450	535
Instalación Fotovoltaica autoconsumo (P ≤ 10 kWp).	600	710
Instalación eólica (500 kW < P ≤ 5.000 kW) para autoconsumo.	650	775
Instalación eólica (20 kW < P ≤ 500 kW) para autoconsumo.	1.950	2.250
Instalación eólica (P ≤ 20 kW) para autoconsumo.	2.900	3.350

Ilustración 3. Listas de incentivos económicos. (BOE, 2022)

Observando la ilustración 3, como se comentó previamente, para combatir las fluctuaciones del precio de la luz, el gobierno lanza una serie de ayudas para fomentar la implantación de energía renovables. Estas energías son de carácter residencial. Como se puede ver en la ilustración superior, las cuatro primeras filas son de carácter fotovoltaico y las tres restantes son de carácter eólico.

En este caso, enfocándose en las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo, ya que son las más frecuentes, lo más destacable es ver cómo estas ayudas que vienen recogidas en el BOE dependen de los kilovatios picos que aporte el módulo fotovoltaico. Esto se ve mejor en un ejemplo; Si hay una instalación de 3 kW y la generación puede aportar 10 kWp, el incentivo aplicado según la columna 1 de la ilustración podría ser de unos 1800€ ($600 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 3\text{kW}$). Además, estas ayudas también tienen incentivos económicos por autoconsumo en comunidad (ilustración 3 columna 2). Dónde haciendo un uso eficiente de la instalación, por ejemplo en una comunidad de vecinos, se puede sacar mayor rentabilidad y hacer un mejor uso gestionado del autoconsumo. También hay ayudas para fomentar el sistema de almacenamiento (BOE, 2022) donde se puede tener un autoconsumo con un sistema de almacenamiento de baterías y tratar de explotar al máximo la rentabilidad de esta red.

Con todo este análisis, es lógico pensar que la energía solar y el autoconsumo ha logrado instalarse y poco a poco ir aumentando la puesta en marcha en el sector residencial.

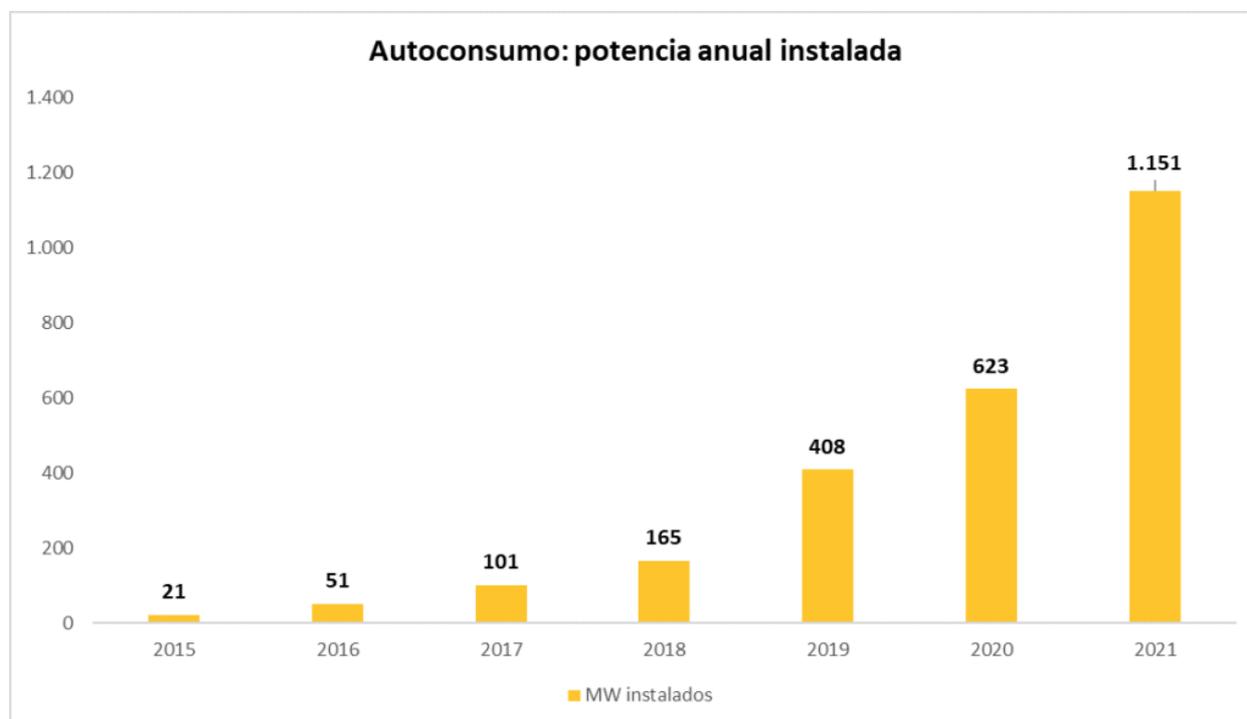


Ilustración 4. Evolución de la potencia instalada en España. (Canales sectoriales, 2022)

Habiendo analizado la evolución del precio de la luz de los últimos dos años y las ayudas que se imparten por parte del gobierno para incentivar el autoconsumo de energía renovable, es buen momento para analizar la evolución de la instalación del autoconsumo en España y ver por qué en los momentos cruciales se apuesta más por el autoconsumo y dar ese gran paso a la instalación de la energía solar en el sector residencial.

Como se puede observar en la ilustración 4, se tiene un enfoque global de la evolución de la potencia instalada en España desde el año 2015 hasta el año 2021. Analizando la imagen, se puede ver un aumento considerable entre los años 2019 y 2020, donde en el año 2020 aumenta dicha potencia instalada siendo un 1.5 veces superior al año previo. Si se sigue la línea del análisis, el año 2021 se supera con mil Megavatios instalado de autoconsumo, siendo casi 2 veces superior a 2020. Los datos de 2022 se superaron los 2.5 Gigavatios de potencia instalada, es decir, se duplicaron otra vez valores con respecto a años previos (Fariza, 2023).

El momento más crucial que se puede observar, donde claramente se apuesta por la implantación de la energía renovable y el autoconsumo, es entre los años 2019 y 2021. Actualmente esta tendencia sigue en auge.

Como se comentó previamente, el periodo clave para apostar por la generación autosuficiente fue en el año

2020, donde se adquirió mas conciencia por el precio de la energía. Este último dato y el aumento de las ayudas explican el crecimiento exponencial de este sector. Observando y analizando esta tendencia, en un sector que está en aumento y cada año los números de potencia instalada se van duplicando, se debe estar preparados para saber gestionar esta demanda y explotar bien estos recursos.

1.1.3) Evolución del Vehículo eléctrico

Junto con la implantación de paneles solares para favorecer el autoconsumo, tambien se va observado un crecimiento exponencial en la compra de vehículos eléctricos. Esta clase de vehículos han visto su aumento debido a la incorporación de planes energéticos que incentivan su compra. Estas acciones sumadas a la incorporación de estaciones de recarga para la batería de estos dispositivos hacen que la compra sea mas viable. Actualmente, existe vigente un plan que incentiva la compra de vehículos de movilidad eléctrica, el plan MOVES III, que dispone de un presupuesto inicial de 400 millones de euros y que los particulares interesados podrán adquirir una subvención de hasta 7 mil euros. Dicho plan tambien es aplicado a usuarios que estén interesados en vez de un vehiculo eléctrico, en un modelo híbrido con cierta autonomía. (El motor, 2022)

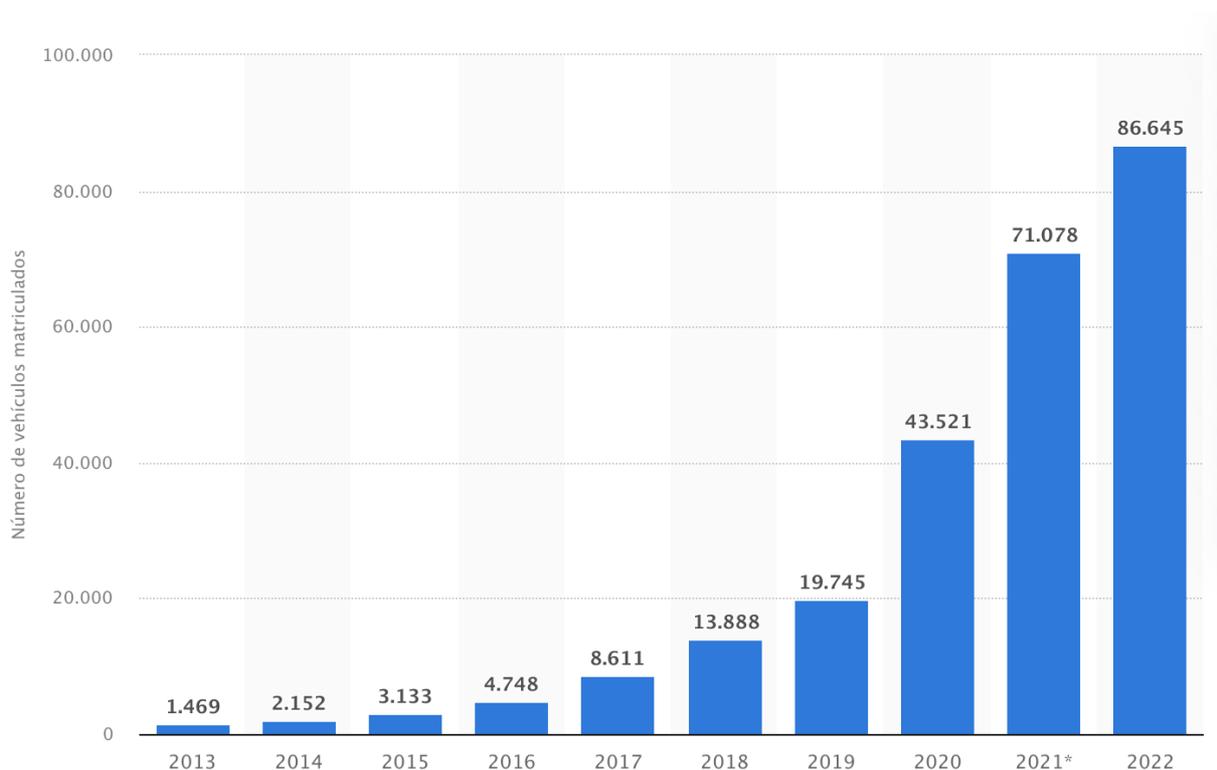


Ilustración 5. Matriculación de coches eléctricos. (Orus, 2023)

Una vez que se han explicado los planes vigentes que incentivan la compra de vehículos de movilidad eléctrica, se hará un enfoque global año tras año desde 2013 representado en la ilustración 5. Como se puede observar, el crecimiento entre los años 2013 y 2019 fue muy lento, pero a partir del 2020, con las nuevas iniciativas económicas (plan MOVES 2020) con ayudas de hasta 6500€ (Híbridos y eléctricos, 2020) ha sido el incentivo que ha hecho prosperar la demanda de vehículos eléctricos. Con respecto al año 2021, se lanzó la propuesta MOVES 2021, que mejoró considerablemente los números con respecto al año previo, siendo 1.6 veces superior, una vez más casi duplicando los valores. Finalmente, en el año 2022 se inició el plan MOVES III, resultando ser un éxito ya que se volvieron a duplicar las cifras del año anterior.

Estas cifras irán en aumento debido a la nueva ley europea en la que prohíbe vender vehículos de gasolina, diesel e híbridos a partir de 2035 (Fernández, 2023). Debido a esta repentina aceleración por la apuesta del coche eléctrico frente al convencional, se han ido instalando puntos de carga para este tipo de vehículos para satisfacer dicha demanda.

1.1.4) Ventajas e Inconvenientes

En esta introducción se han tratados dos de los factores que están a la orden del día para combatir el aumento del precio del gas y de la energía. Como se puede observar, ambos puntos están enlazados mediante el uso de trasvase de energía de continua. Poco a poco el consumidor va haciendo mas uso de la energía de continua, teniendo este pensamiento en mente, por qué no hallar la posibilidad del consumo o generación directamente desde continua. Dicho esto, puede plantear un problema inicial desde el punto de vista del consumo, ya que se tiene distribución en alterna, mas una distribución paralela en continua. Pero aprovechando este gran avance de tener flexibilidad en ambas líneas, se puede aprovechar para acercar el consumo a la generación, hacerla mas eficiente y poder maximizar la explotación de la red.

En cambio, el actual modelo de la red de baja tensión no está preparado para la integración masiva de estas nuevas formas de consumo. Para ello, poco a poco se podría ir modificando la forma de la red para adaptarse a la nueva forma de alimentación a los consumidores para hacerla directamente desde continua, así se eliminan procesos de conversión donde se canalizan la mayor parte de las pérdidas del sistema y se mantiene más estable y menos sobrecargada la red de distribución (ORtega, 2017). La idea del transporte en continua no es nueva, existen grandes redes donde se hace el transporte por continua, por ejemplo, en la generación eólica en alta mar (Offshore) se utiliza un sistema de energía basados en HVDC (High Voltage Direct Current), donde el transporte de dicha energía por razones de costes de cableados se escoge la corriente continua frente a la alterna. (marino, 2018). No solo en Offshore, también China y multitud de proyectos en Europa están apostando por esta forma de transporte de energía que está en auge.

1.2 Objetivo de este estudio

Una vez realizada la revisión actual del incremento de generación y carga en continua en España, el trabajo de investigación que se va a realizar en este proyecto cobra más fuerza, ya que se tiene que estar preparado para integrar la demanda masiva de estas fuentes de energías que están a la orden del día. Para ello, en este proyecto se va a realizar la incorporación de una red de continua en la red de alterna, ofreciendo una vía alternativa para que fluya la potencia y así poder minimizar pérdidas, consiguiendo con ello que la red sea más estable a fluctuaciones y favoreciendo la integración de la potencia continua en la red modelo. Esto permitiría dar soporte a un sector que anualmente está en auge y con la implantación de este proyecto se daría cabida a la actual disposición de la red que se conoce.

Durante el proyecto de investigación se trataran estos tres puntos fundamentales:

1. Conseguir implementar una gestión más óptima de la red: A través del flujo de carga y *OPF* de los casos de estudios, partiendo del caso base, se pretende minimizar la potencia del nudo *slack* y con ello conseguir una gestión más optimizada de la potencia para así reducir pérdidas.
2. Mejorar el perfil de tensiones: A raíz de este estudio, se analizará si la incorporación de la red de continua producirá un impacto positivo en el análisis de las tensiones. A través de la comparación entre el caso radial y las mejoras que se le irán adhiriendo al modelo, se analizará el perfil de dichas tensiones.
3. Mejorar el perfil de intensidad: Una vez analizado el perfil de tensiones, se realiza un análisis de igual forma para el perfil de intensidades. Partiendo del caso base, se analizará caso por caso si la incorporación de dicha red de continua con sus respectivas mejoras, consigue un mejor perfil de intensidades.

2 MODELO DE LA RED DE BT PARA FLUJO DE CARGA

EN esta sección se va presentar el modelo del flujo de carga y flujo de carga óptimo de una red de distribución radial, a la cual se le añade una red de continua para convertirla en híbrida. Para ello, se va a presentar de manera progresiva el modelo correspondiente a cada una de las partes de los distintos casos de estudio a tener en cuenta. De esta manera, además de presentar el modelo, va a permitir evaluar y comparar el impacto de la red híbrida conforme se añaden componentes y exactitud en el modelo del sistema tal y como se estudiará en la sección de resultados.

El análisis realizado en el siguiente proyecto ha sido ver el impacto que se produce gradualmente en la red al introducir una línea de continua. La idea a seguir es la siguiente: se escogerá una red radial a escala y se ejecutará un flujo de cargas. Tras este caso base, se implementará el mallado de la red paso por paso y se analizará la evolución que sufre a través de cada una de las mejoras. Una vez realizado el caso a escala se pasará al caso real donde, además de tener nudos de consumo, se tienen nudos de generación PV, y es ahí donde la investigación cobra fuerza y se verán resultados fiables acorde al estudio desarrollado.

2.1. Radial Simple

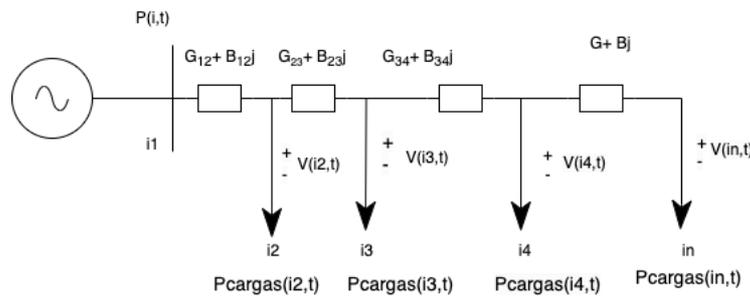


Ilustración 6. Esquema equivalente monofásico red radial de n nudos.

En la ilustración 6 se tiene una red de n nudos, la red modelo a la que se va a aplicar un flujo de carga. Como se puede observar, se tiene el nudo "1", que es el nudo generador, al que se le suele denominar nudo *slack* y a continuación se tienen distintos nudos que son cargas del sistema. Se puede apreciar que la unión entre nudos se compone de conductancias, que se denotan con la letra G y de susceptancias con la letra B. También se puede apreciar parámetros que resultarán interesantes a la hora de realizar el flujo de carga, como son las potencias de cargas de cada nudo $Pcargas(i_n, t)$, la tensión de cada nudo $V(i_n, t)$ y la potencia aplicada por los nudos generadores $P(i, t)$. Las ecuaciones que definen el flujo de carga del sistema se definen a través de los siguientes balances de potencia activa y reactiva en los nudos de la red.

$$P(i, t) + Pcargas(i, t) = V(i, t) * \sum_{j=1}^{nudos} V_j (G_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.1.1)$$

$$Q(i, t) + Qcargas(i, t) = V(i, t) * \sum_{j=1}^{nudos} V_j (G_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.1.2)$$

En las ecuaciones arriba descritas, se ha aplicado el flujo de cargas a la red radial. En la ecuación (2.1.1) se ha realizado el balance de potencias activas, donde hay parámetros interesantes, $P(i, t)$, que son las potencias

activas aplicadas por los nudos generadores. Otro parámetro interesante que se puede apreciar en la ecuación es $P_{cargas}(i, t)$, es el perfil de consumo de las cargas del sistema, es decir, la potencia especificada de cada nudo que compone el sistema. En la ecuación (2.1.2), como se puede observar, es muy similar a la ecuación de arriba, solo que en esta ecuación se realiza el balance de potencias reactiva. Tras ejecutar el flujo de carga y hacer el balance de potencias activa, la función objetivo deseada es la minimización de la potencia del nudo *slack*, es decir, $\sum_{t=1}^n P(i_1, t)$ minimizar la potencia de los nudos generadores proyectada sobre el nudo "1" para todos los instantes de tiempo de simulación.

2.2. Modelo Back to Back

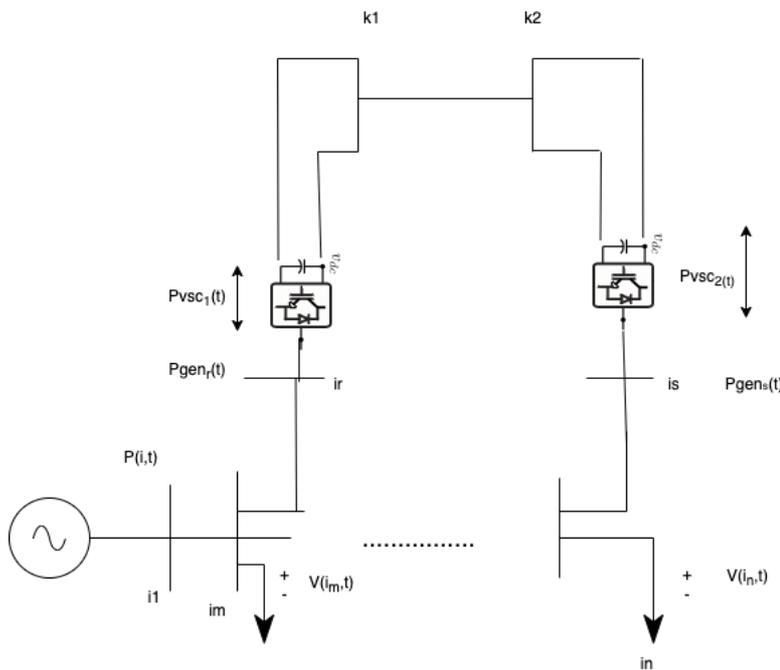


Ilustración 7. Esquema equivalente monofásico Back to Back red de n nudos.

Para realizar una red híbrida es necesario convertir la corriente alterna en continua. Para ello se utilizan convertidores de fuente controlada (VSC, del inglés voltaje source converter) que permiten establecer una red de continua. Con el objetivo de dotar de una flexibilidad al sistema se decide mallar la red de continua y alterna añadiendo un segundo VSC tal y como se representa en la ilustración 7. Este segundo VSC permite que se pueda trasvasar energía entre las redes de alterna y continua a través de la topología back to back. Inicialmente, ambos convertidores estarán unidos idealmente, sin pérdidas. Como se puede observar, los convertidores, están unidos en la red a través de los nudos "m" y "n". La incorporación de dichos convertidores de fuente controlada se verá reflejada, en el balance de activa y reactiva, que será un término relacionado con la potencia que se trasvasa por la línea auxiliar de continua y que también estará directamente relacionado con la potencia que mueven ambos convertidores.

$$0 = \sum_{i=1}^n (Pgen_r(t) * generacion_r(i) + Pgen_s(t) * generacion_s(i)) \quad (2.2.1)$$

$$Sconv_1 \geq \sqrt{(Pgen_r)^2 + (Qgen_r)^2} \quad (2.2.2)$$

$$Sconv_2 \geq \sqrt{(Pgen_s)^2 + (Qgen_s)^2} \quad (2.2.3)$$

$$\begin{aligned} P(i, t) + Pcargas(i, t) + Pgen_r(t) * generacion_r(i) + Pgen_s(t) * generacion_s(i) \\ = V(i, t) * \sum_{i=1}^{nudos} V_i * V_j (G_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j) + Bij * \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.2.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(i, t) + Qcargas(i, t) + Qgen_r(t) * generacion_r(i) + Qgen_s(t) * generacion_s(i) \\ = V(i, t) * \sum_{i=1}^{nudos} V_i * V_j (B_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j) - G_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.2.5) \end{aligned}$$

En la ecuación (2.2.1), se ha plasmado lo previamente descrito. El balance que se realiza en la línea de continua, al ser una línea ideal sin pérdidas, lo que se absorbe en el nudo “r” se inyecta en el nudo “s” y viceversa.

En las ecuaciones (2.2.2) y (2.2.3) se añaden las restricciones de potencia aparente de los dos convertidores situados en los nudos “r” y “s”, es decir, que no pueden inyectar mas de la potencia nominal P.u cada uno. Como se puede observar, al final lo que refleja la ecuación es un triángulo de potencias.

Finalmente, las ecuaciones (2.2.5) y (2.2.6) son muy parecidas a la del modelo previo, solo que se incluyen estos términos: $Pgen_r(t) * generacion_r(i) + Pgen_s(t) * generacion_s(i)$, donde las variables generación valen “1” para los nudos que están conectados a los backs to back y “0” para el resto que no lo están. Este análisis tambien es similar para el balance de reactiva. Estos nuevos términos añadidos en los análisis nos permiten integrar de manera compacta las potencias que manejan nuestros convertidores en el modelo de flujo de carga.

2.3. Modelo Back to Back más pérdidas

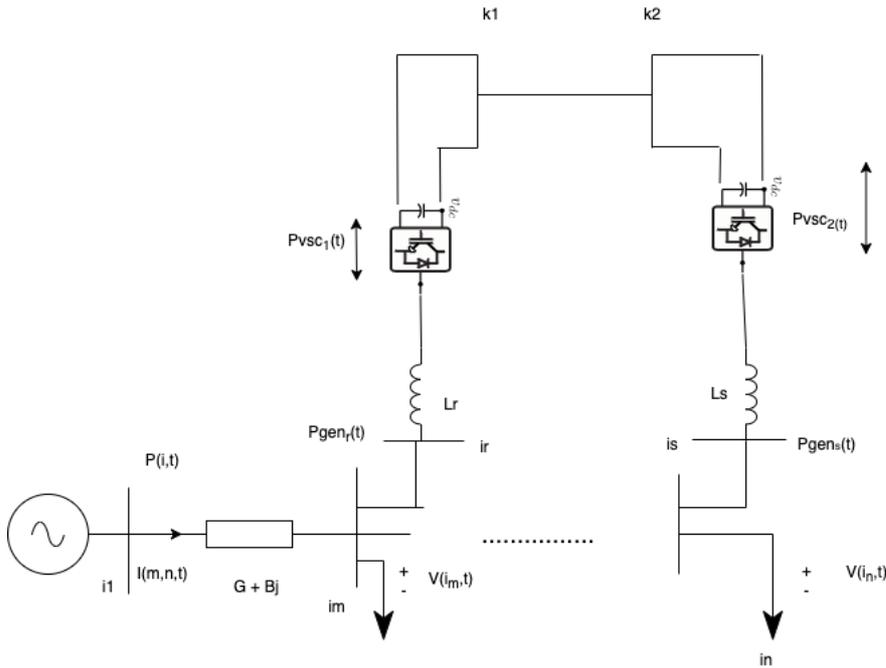


Ilustración 8. Esquema monofásico Back to Back mas pérdidas red de n nudos.

Una vez obtenido el intercambio de potencia que se realiza entre los nudos interconectados idealmente por dos convertidores sin pérdidas, el siguiente paso es añadir las pérdidas del sistema del filtro de acoplamiento de los y las pérdidas por conmutación de los VSC.

Como se observa en la ilustración 8, se han modelado las pérdidas que se producen en el filtro “L” mediante una reactancia pura. Además del modelado del filtro de dichos convertidores, también se han tenido en cuenta las pérdidas asociadas al propio convertidor modelado con una ecuación cuadrática que agrupa las pérdidas por conmutación y conducción de los IGBTs del VSC. Finalmente, se han modelado las intensidades que circulan por las ramas que nos servirán para cuantificar las pérdidas asociadas a la línea de alterna.

$$I^2r(i,j,t) = V(i,t) * (G(i,j) * \cos(\theta(i,t)) - B(i,j) * \sin(\theta(i,t))) + V(j,t) * (B(i,j) * \sin(\theta(i,t)) - G(i,j) * \cos(\theta(j,t))) \quad (2.3.1)$$

$$I^2i(i,j,t) = V(i,t) * (B(i,j) * \cos(\theta(i,t)) + G(i,j) * \sin(\theta(i,t))) + V(j,t) * (-B(i,j) * \sin(\theta(i,t)) - G(i,j) * \cos(\theta(j,t))) \quad (2.3.2)$$

$$I^2(i,j,t) = (I^2r(i,j,t))^2 + (I^2i(i,j,t))^2 \quad (2.3.3)$$

$$Perdidas VSC_r(t) = a * I^2(i,j,t) + b * \sqrt{|I^2(i,j,t)|} + c \quad (3.2.4)$$

$$Perdidas VSC_s(t) = a * I^2(m,n,t) + b * \sqrt{|I^2(m,n,t)|} + c \quad (3.2.5)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n (Pgen_r(t) * generacion_r(i) + Pgen_s(t) * generacion_s(i) + Perdidas VSC_r(t) + Perdidas VSC_s(t)) \quad (3.2.6)$$

$$Perdidas AC(t) = \sum_{i=1}^{nudos} \sum_{j=1}^{nudos} (I^2(i,j,t) * R(i,j)) \quad (3.2.7)$$

En primer lugar, para calcular las pérdidas del sistema se ha tenido que calcular la intensidad que circula por cada una de las ramas. En las ecuaciones (2.3.1) y (2.3.2) se han calculado los términos reales e imaginarios respectivamente de dichas intensidades. Una vez obtenido estos dos términos, se calcula el valor absoluto de la intensidad en la ecuación (2.3.3).

A continuación, se cuantifican las pérdidas de los VSC. Para el cálculo de estas pérdidas se ha escogido el modelo cuadrático. En las ecuaciones (2.3.4) y (2.3.5) se observan las pérdidas de ambos convertidores, que se basan en: un parámetro fijo multiplicado por la intensidad al cuadrado, sumado de un término fijo multiplicado por el valor de la intensidad más un término constante. Como se ha descrito, hay dos términos que son dependientes al paso de la circulación de intensidad donde está conectado dicho convertidor, y un término fijo. Este término fijo se corresponde con las pérdidas de conmutación del convertidor simplemente por estar conectado a la red, y que siempre va a tener nuestro sistema. Como se comentó en el punto previo, ambos convertidores son similares. La ecuación que modelan sus pérdidas es idéntica, pero situados en nudos distintos de nuestra red.

Avanzando en el análisis, la ecuación (3.2.6), como se puede observar, es muy similar a la que se había analizado en el caso anterior, pero con un punto adicional, donde se han modelado ambas pérdidas de los convertidores, comparando este caso con el anterior. Antes, se tenía una fluctuación de potencia idéntica entre ambos convertidores, es decir lo que absorbía uno, lo inyectaba el otro. En este caso no. Al modelar las pérdidas, habrá un valor inferior en el convertidor que inyecte potencia. Resultado lógico, ya que tendrá que vencer las pérdidas del filtro de acoplamiento situado en el nudo de alterna más las pérdidas que modelan ambos convertidores.

Finalmente, queda por analizar la última ecuación, donde se calculan las pérdidas asociadas a la línea de alterna, como se modela en la ecuación (3.2.7). Se puede observar el término de la intensidad al cuadrado, ya calculada previamente, multiplicada por la matriz de resistencias. Una vez hecho esto, se calcula el sumatorio tanto en “i” como en “j” para que no dependa del nudo en el que esté situado y tan solo se quede un parámetro dependiente del tiempo. Este parámetro es útil para cuantificar las pérdidas asociadas a la línea de alterna de la red.

2.4. Modelo con línea DC

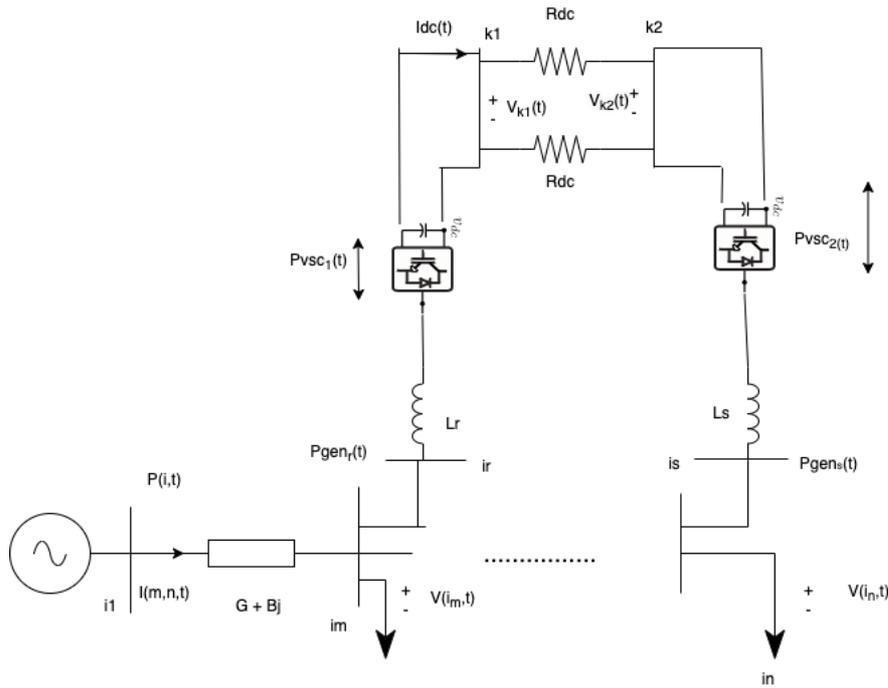


Ilustración 9. Esquema monofásico línea DC.

Este modelo de ensayo que se ha tratado para finalmente mallar el sistema consiste en implementar una línea de continua que une ambos convertidores. Esta línea de continua se modela a través de dos nudos de continua, “k1” y “k2”, y entre ellos se sitúa una resistencia, “Rdc”, que modela el cableado que existe de continua entre ambos modelos. Además, un parámetro muy interesante de estudio que se ha plasmado en la ilustración superior es la intensidad de la rama de continua, para así cuantificar de qué orden es la intensidad que circula por dicha red auxiliar.

$$Vdc_{k1}(t) = 2 * 1(2.4.1)$$

$$Idc(t) = \frac{Vdc_{k2}(t) - Vdc_{k1}(t)}{2 * Rdc} \quad (2.4.2)$$

$$Pdc(t) = Idc(t) * Vdc_{k2}(t) \quad (2.4.3)$$

$$Pgens(t) = Pdc(t) - PerdidassVSCs(t) \quad (2.4.4)$$

$$-Pgenr(t) = Pdc(t) + PerdidassVScr(t) \quad (2.4.5)$$

$$Plossdc(t) = 2 * Rdc * Idc(t)^2 \quad (2.4.6)$$

$$PerdidassT(t) = Plossdc(t) + PerdidassAC(t) + PerdidassVScr(t) + PerdidassVSCs(t) \quad (2.4.7)$$

Tras la implementación de la línea de continua, en (2.4.1) se puede observar la ecuación que fija la tensión del bus de continua. El objetivo de esta ecuación es fijar un valor de tensión al nudo que esté conectado al bus de continua. En este caso, como se puede observar, se le asigna a “k1” el valor de 2 p.u.

El siguiente paso sería hablar de la potencia que fluye por esta línea auxiliar. La ecuación que modela la potencia que mueven ambos convertidores dependerá de la direccionalidad que tenga la intensidad $Idc(t)$, es decir, dependiendo del sentido que tenga la intensidad en el instante de tiempo, el convertidor absorberá o inyectará potencia. Dicho esto, las ecuaciones (2.4.4) y (2.4.5) son las que modelan la potencia que manejan ambos convertidores. Al depender del parámetro $Pdc(t)$, uno absorberá potencia y el otro la inyectará, por lo cual es lógico pensar que la potencia que maneja el convertidor que absorbe activa es mayor que la potencia

Finalmente, como se describe en las ecuaciones (2.5.1), (2.5.2) y (2.5.3), se distribuye la generación de las cargas entre la línea de alterna y la línea de continua, mediante un factor que se ha denominado “C”, donde en los casos de estudios que se han realizado “C” pueden valer entre “0” y “1”, y por la red de continua se vuelca lo restante, es decir, $1 - C$.

Para estudiar la viabilidad del sistema se han declarado unas variables auxiliares, como son las intensidades que circulan por los nudos intermedios, que indican el sentido por donde va fluyendo la intensidad. Se analizará cada una de las variables de las intensidades para ver en todos los instantes de tiempo como fluye la energía por la línea de continua y el comportamiento de ambos convertidores. Una vez ejecutado el flujo de carga, se verá si es interesante la introducción de un nudo auxiliar en continua por el que volcar una posible generación de alterna o incluso un posible sistema de almacenamiento en batería.

3 VALIDACION EN RED PEQUEÑA ESCALA

EN este capítulo se va a validar las ecuaciones en el punto previo descrito, para así llegar al caso de estudio final que sería implementar el estudio en una red real. Este paso previo se ha analizado en una red de 4 nudos como la representada en la ilustración 11 y cuyos valores numéricos se pueden observar en la tabla 1.

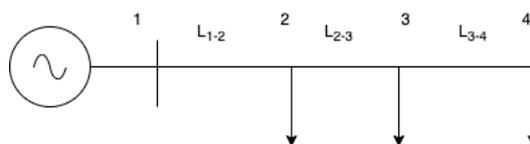


Ilustración 11. Esquema monofásico equivalente monofásico red radial.

Parametros	Valor numérico
R	0.161 Ω/km
X	0.109 Ω/km
L ₁₋₂	2 km
L ₂₋₃	2 km
L ₃₋₄	5 km
Rdc	$\sum_{i=1}^4 R(i,j)$

Tabla 1 Parámetros de la red modelo.

3.1 Descripción de la red

Es una red de media tensión cuya tensión base es de 20 kV y su potencia de red de 1 MVA. La idea principal que trata es un paso previo antes de estudiar la red real de baja tensión. Como se puede observar en la ilustración 11, en este caso radial hay 4 nudos; el nudo “1”, que está conectado al generador principal y que se denomina como nudo *slack*, y los nudos restantes “2”, “3” y “4” son nudos de consumo o generación. A través de la herramienta de software Gams, se realizará un cálculo de optimización cuya función objetivo será minimizar la potencia del nudo *slack*, a través de un solver matemático llamado “Dicopt” y dentro del cual se empleará la herramienta NLP (Non Linear Programming). La utilidad de esta herramienta se basa en maximizar o minimizar la función objetivo donde haya en juego varias ecuaciones o restricciones que sean ecuaciones no lineales (Tarapuez & Barrera, 2010). En este caso se utilizará para minimizar la potencia del nudo “1”.

Los casos de estudios en este modelo de pequeña escala son los siguientes:

- 1.) Modelo Radial (Radial): Es el primer modelo de estudio, que se corresponde con la ilustración 11 y al modelo matemático 2.1. Se utilizará como base para comparar resultados con el resto de modelos a estudiar. Consiste en un flujo de cargas que nos permite calcular las tensiones de los nudos, corriente de las ramas y la potencia del nudo *slack*.

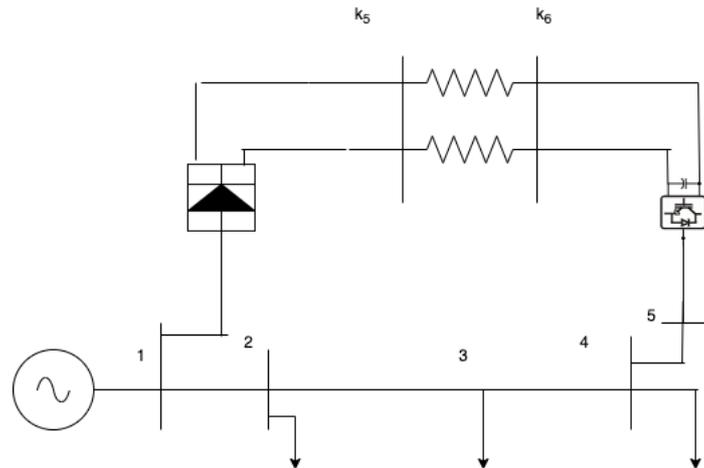


Ilustración 12. Esquema equivalente monofásico rectificador más VSC ideal.

- 2.) Modelo rectificador más VSC (VSC): Este caso hace referencia a la ilustración 12 en el que se interconecta el nudo “1” y “4” a través de un enlace de continua. La etapa de conversión de alterna a continua se realiza a través de un rectificador de onda completa y la conversión de continua a alterna en el nudo “4” mediante un convertidor VSC. El modelo utilizado para representar el sistema se corresponde con el presentado en la sección 2.2, se une el nudo “1” con el “4” a través de una línea de continua. Estos dos nudos quedan unidos por una resistencia de continua. El valor que modela esa resistencia de continua es igual al sumatorio de todas las resistencias que se sitúan entre los nudos “1” y “4” (tabla 1), para así hacer un análisis entre dos magnitudes similares en el estudio de la viabilidad de la red de continua. En el nudo “4” se introduce un convertidor VSC y el nudo “1” se modela a través de un rectificador de onda completa basada en diodos. La diferencia entre ambos convertidores es que el VSC puede inyectar y absorber potencia activa y reactiva, mientras que el de onda completa solo puede realizar flujos de activa y fijar la tensión del bus de continua “ k_5 ” a $\sqrt{2}$ p.u. No se consideran las pérdidas de ambos convertidores, pero permitirá analizar cómo influye mallar la red mediante esta topología. El objetivo del *OPF* será minimizar las pérdidas de explotación de la red analizando variables de estudios interesantes como son la potencia de ambos convertidores y la potencia reactiva del VSC.

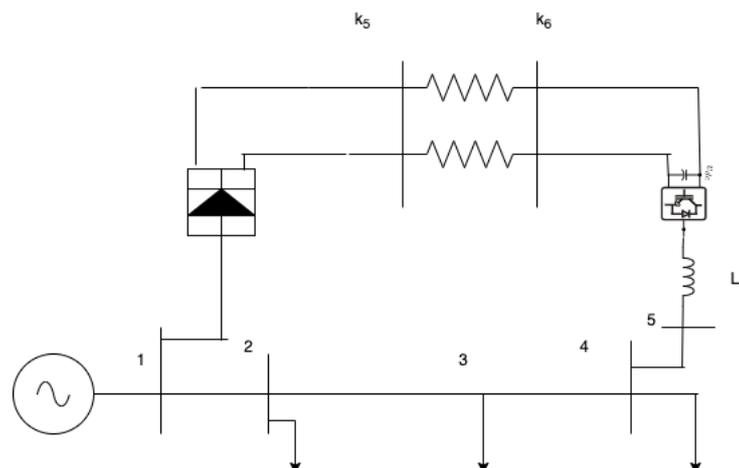


Ilustración 13. Esquema equivalente monofásico rectificador más VSC con filtro.

- 3.) Modelo rectificador VSC más filtro (VSCfiltro): Este ejemplo se presenta en la ilustración 13 y está relacionado con el modelo matemático adaptado que se introdujo en la sección 2.3. Se añade un filtro “ L_5 ” entre el nudo “ k_6 ” y “5”, que representa la unión física entre la línea de alterna y la de continua. El modelo de este filtro es una reactancia pura. Al incluir esta reactancia, se están incluyendo implícitamente unas pérdidas de reactiva al sistema debido al valor puramente reactivo de esta impedancia.

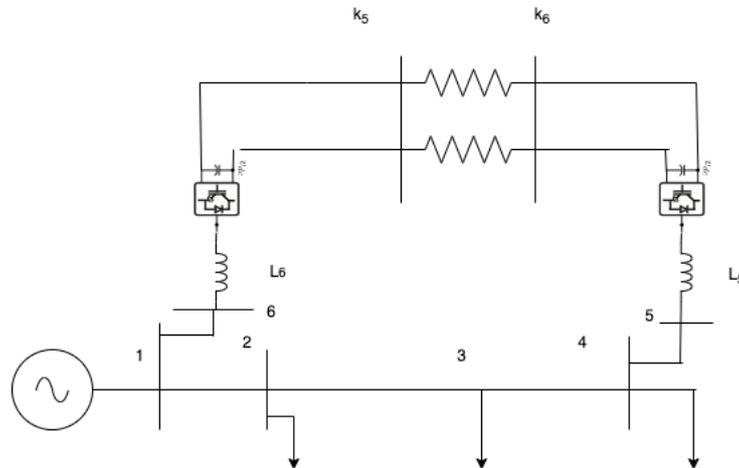


Ilustración 14. Esquema monofásico modelo doble VSC.

- 4.) Modelo Doble VSC (VSCdoble): En este modelo final mostrado en la ilustración 14, se cambia el rectificador de onda completa, situado en el nudo “6”, por un VSC del mismo modelo que se encuentra en el nudo “5”, obteniendo una red inicial de 4 nudos, a la que se ha implementado dos filtros “ L_5 ” y “ L_6 ”, más dos nudos adicionales para modelar la unión de alterna y continua, dicho modelo pertenece al introducido en el punto 2.4. Al cambiar el rectificador de onda completa por el VSC, se tiene fijada la tensión del bus de continua “ k_5 ” a 2 p.u, y finalmente la línea de continúa modelada a través de dos nudos y una resistencia entre ambos. En este caso al contemplarse tanto las pérdidas de continua como las pérdidas acarreadas a ambos convertidores, el *OPF* tratará de minimizar la potencia del nudo *slack*, para ello se analizarán parámetros como la potencia activa que manejan ambos convertidores, potencia reactiva, la intensidad entre ambas ramas y la tensión de los nudos, entre otras magnitudes. En resumen, este modelo es el más realista debido a que se tienen modeladas todas las pérdidas posibles en el sistema.

3.2 Comparación de los resultados

En este apartado se va a analizar de manera gráfica los resultados obtenidos en cada uno de los casos de estudio, inicialmente de 4 nudos y sus posteriores mejoras, aplicando las ecuaciones vistas en el punto 2.

La primera variable a analizar es el perfil de consumo de las cargas situadas en los nudos 2, 3 y 4. Esta variable es muy interesante de estudiar porque entendiendo el perfil de consumo, se pueden entender los resultados obtenidos a continuación.

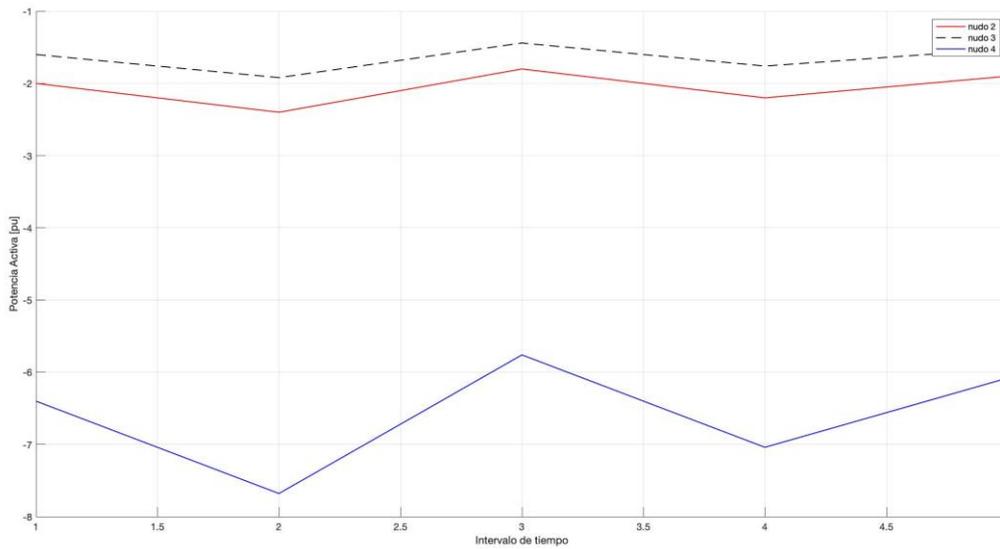


Ilustración 15. Evolución de la potencia activa en las cargas.

Analizando la ilustración 15, se pueden observar 5 intervalos de tiempo donde se muestra el perfil de carga y generación de los nudos del sistema. Como curiosidad, se puede apreciar que todos los perfiles de la red son cargas, no existe generación. Profundizando en perfil, el intervalo de tiempo donde más se verá afectado el sistema, es en el intervalo donde el consumo sea mayor, es decir, el instante donde las cargas demanden más potencia. Este punto corresponde al segundo intervalo de tiempo, como se observa en la imagen todas las cargas aumentan considerablemente.

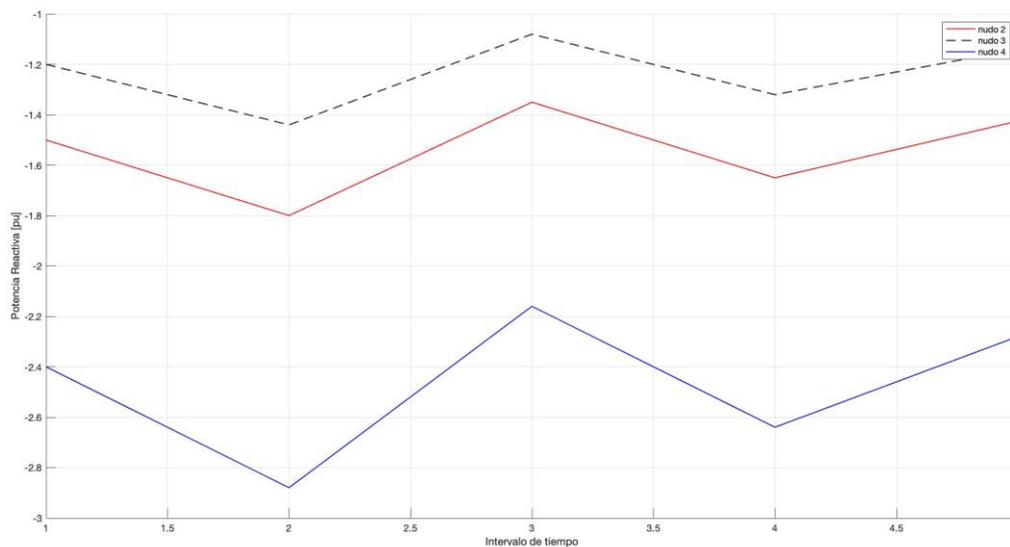


Ilustración 16. Evolución de la potencia reactiva en las cargas.

En el caso de la reactiva (ilustración 16), dicha repercusión también se verá afectada a las tensiones, ya que a mayor consumo de reactivas las tensiones serán más bajas, y cuando estas disminuyan la demanda de reactiva, el impacto en las tensiones será menor.

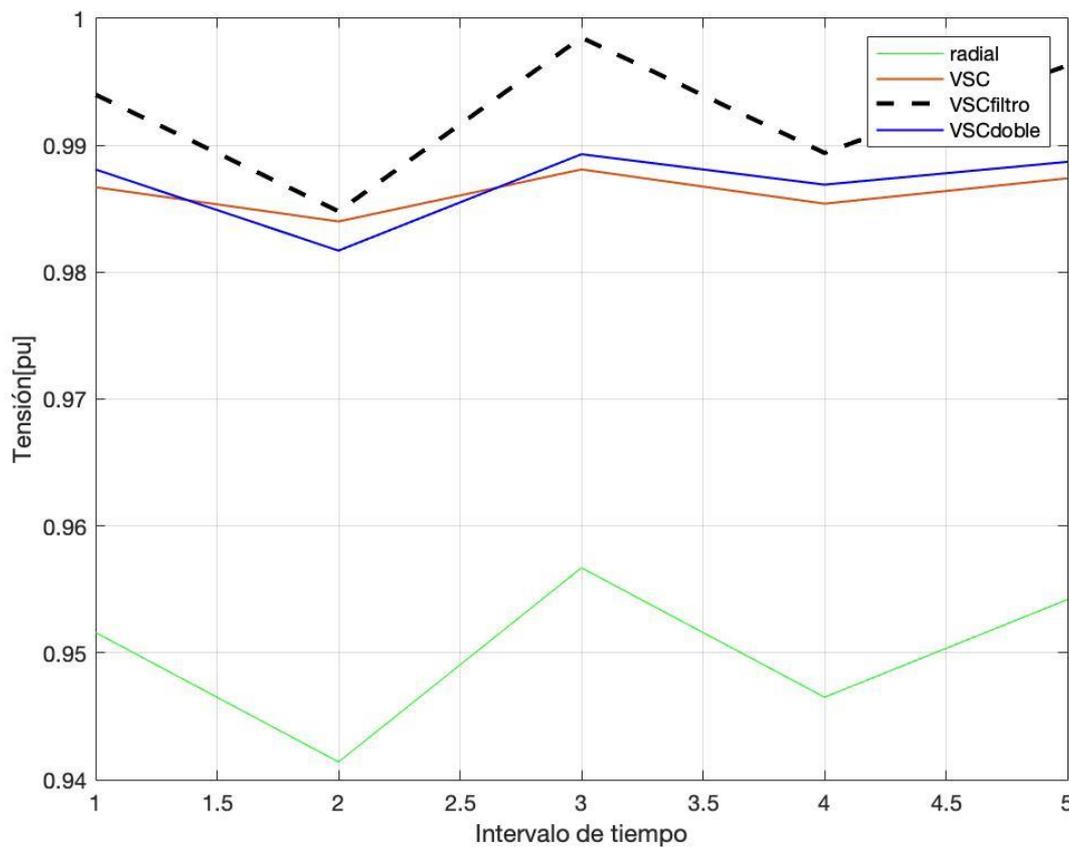


Ilustración 17. Evolución del punto con menor tensión.

Una vez ejecutados los flujos de carga y *OPF* de los casos de estudio, se va a analizar cómo repercute en las tensiones de los nudos. En primer lugar, se va a analizar la tensión del nudo más baja en los 5 intervalos de tiempo significativos mostrados en la ilustración 17. Éste corresponde con el nudo “4”, que alcanza su valor más bajo en el intervalo de tiempo “2” con un valor cercano a 0.94 p.u. Haciendo referencia a la topología de la red (ilustración 11), este resultado tiene sentido debido a que se tiene una red radial simple sin generación y el caso de tensión más desfavorable se obtiene en el punto más alejado de la generación.

Siguiendo con el análisis, en el modelo de estudio 2, se puede observar cómo la tensión mínima aumenta considerablemente hasta un valor muy cercano a 0.987 p.u. Se ha mejorado notablemente su valor, porque se ha logrado elevar mucho la tensión del nudo con peor valor y así hacer que la red tenga un perfil más plano cercano a 1 p.u. Avanzando con el análisis, en el tercer caso de estudio se obtiene un valor 0.988 p.u., valor levemente superior que en el caso 2 y que es debido a la incorporación del filtro. Hay que tener en cuenta que al ser una impedancia puramente reactiva hace que baje las tensiones, por lo que habría que inyectar reactiva para subirla. Otro punto a destacar es, que a diferencia del modelo VSC, en el modelo VSC con filtro se obtienen peores valores de estabilidad en tensiones, es decir, la diferencia entre el punto máximo de tensión y el punto mínimo es mayor para el caso del VSC con filtro.

Finalmente, en el último modelo se alcanza un valor numérico de 0.989 p.u, resultado más bajo comparado con los dos modelos previos debido a que, como se comentó anteriormente, en este caso de estudio se han modelado las pérdidas del sistema y es lógico que las tensiones bajen levemente (como se puede observar en la ilustración 15), pero en el tercer instante de tiempo que se reduce de demanda en las cargas, se logra un valor numérico de tensión de 0.981 p.u. Este punto es muy positivo, ya que se consigue un perfil más plano de tensión. Comparando los instantes donde el sistema puede sufrir más, que son los puntos de sobretensión y subtensión, poco a poco se logra que la diferencia se vaya haciendo más pequeña. Dicho resultado es muy relevante desde el punto de vista de tensiones, debido a que la red se hace menos susceptible a las fluctuaciones en tensiones.

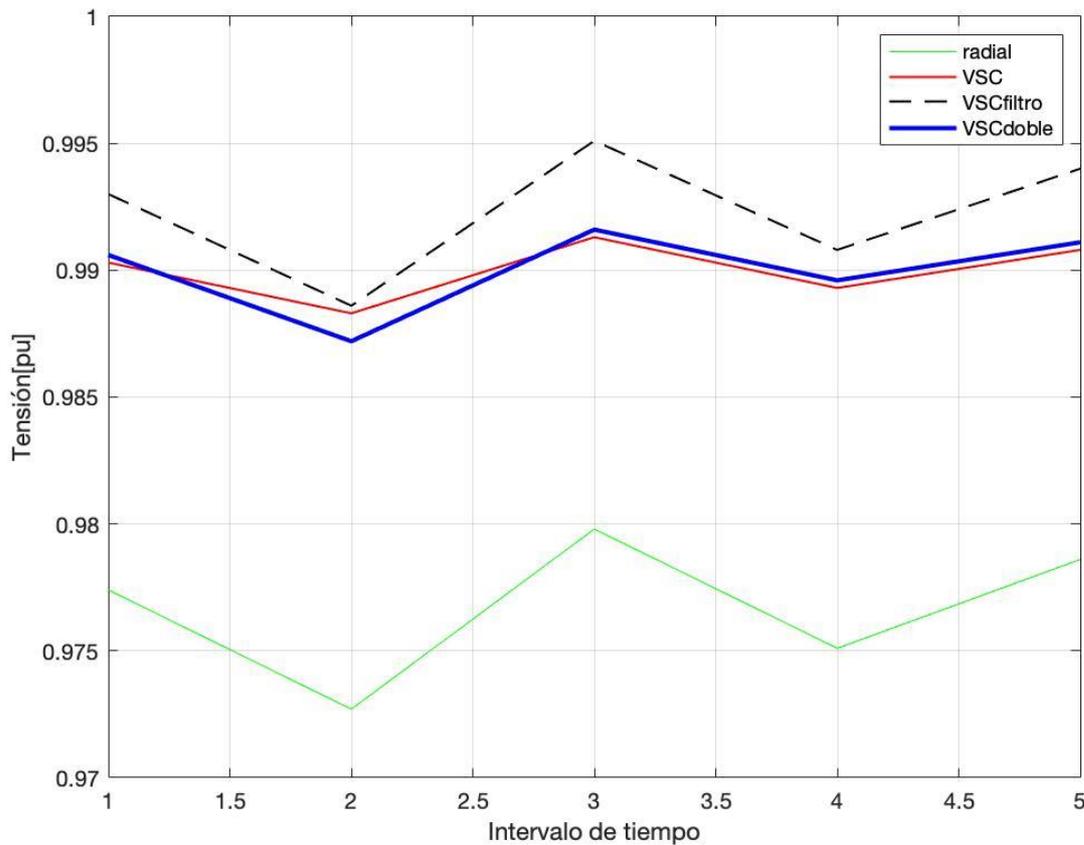


Ilustración 18. Evolución del punto con mayor tensión.

Una vez realizado el análisis del punto con menor tensión, se tratará el caso opuesto. Del caso base, el modelo radial simple, se escogerá el punto que se encuentra a mayor tensión y se realizará el mismo análisis. Como es una red radial simple, el punto de mayor tensión se encontrará más cercano al nudo de cabecera, en este caso es el nudo “2”, que presenta una tensión de 0.979 p.u y un valor mínimo de tensión cuando las cargas reducen su consumo que corresponde con el instante de tiempo “2” de 0.972 p.u.

Avanzando con el análisis del modelo de estudio 2, se puede observar que se eleva considerablemente la tensión hasta un valor de 0.991 p.u. para el caso de la tensión más alta, y un valor de 0.988 para el caso del punto más bajo. Una vez más, suben las tensiones de los nudos que comparando con los otros instantes de tiempo están más bajas. Con respecto al caso anterior, éste es superior ya que se eleva la tensión a valores cercano de 1 p.u.

Continuando con el modelo de estudio 3, el punto máximo de tensión aumenta con respecto al anterior debido a que en este caso de estudio se tiene en cuenta las pérdidas del filtro, obteniéndose un valor de tensión de 0.995 p.u.

Finalmente, en el último modelo, en valores de tensiones se obtienen un menor valor que en el caso previo pero un valor cercano al caso de estudio sin el modelado del filtro. Dicho esto, se comprobará si se consigue el objetivo final de tener un perfil más plano de tensiones comparado con los modelos previos de estudios. El punto más bajo de tensión se consigue en el segundo instante con un valor de 0.987 p.u, y el punto de mayor tensión alcanzado, se produce a 0.991 p.u. Desde el punto de vista de los intervalos de tiempo con mayor tensión, al igual que en la ilustración 17, el modelo de estudio de dos convertidores VSC es el modelo más realista, debido a que el aumento de las tensiones (sin tener en cuenta las pérdidas) es mayor que cuando se introducen las pérdidas de filtro de acoplamiento entre la red de continua y alterna en el modelo.

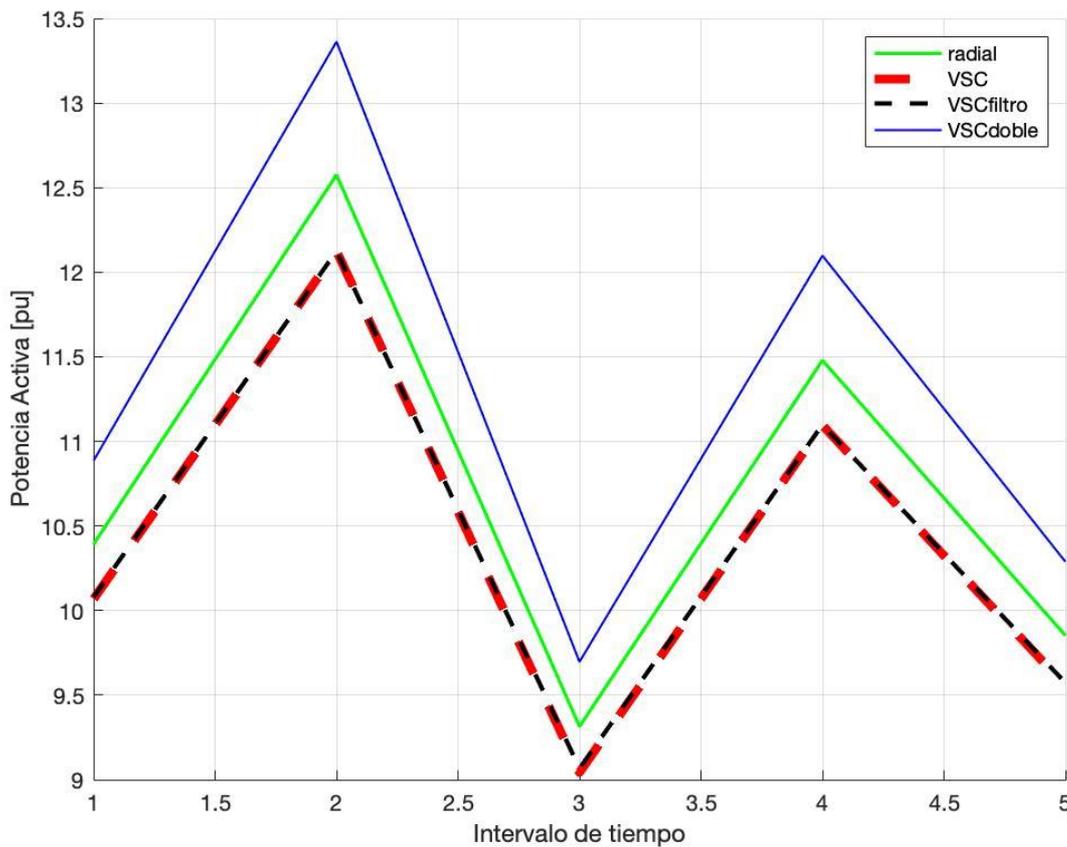


Ilustración 19. Evolución de la potencia aportada por el generador.

La siguiente variable de estudio mostrada en la ilustración 17, es la potencia aportada por el nudo generador, teniendo en cuenta que es la variable a minimizar.

Primero se trata el caso radial, que como se puede observar, el máximo valor es 12.57 p.u y se obtiene en el segundo intervalo de tiempo. Lógico debido a que en este intervalo de tiempo, recordando el perfil de consumo, las cargas estaban demandando más potencia. Tras este máximo, el punto en donde el generador tiene que aportar menos cantidad de activa a nuestro sistema es en el tercer intervalo de tiempo con un valor de 9.31 p.u. Haciendo un análisis muy similar al anterior, en la figura de la evolución de la demanda, al disminuir ésta el nudo *slack* tiene que inyectar menos activa al sistema.

Continuando el análisis con el segundo modelo de estudio, se malla el sistema tras ejecutar el flujo de carga consiguiendo un resultado muy positivo. Se logra reducir la potencia del nudo *slack* a un valor de 12.12 p.u. Siguiendo con este análisis, se puede observar que en el tercer intervalo de tiempo el nudo también inyecta menos activa con un valor numérico de 9.07 p.u. Esto se debe a que el sistema aprovecha la red de continua para transferir potencia a la cola y así minimizar la potencia inyectada por el nudo *slack*.

Avanzando con el tercer análisis, se introduce el filtro, que es un nudo adicional que hace de enlace entre alterna. Como se puede observar, la diferencia entre el segundo caso y el tercero es muy insignificante ya que desde el punto de vista del generador no se ha obtenido mejora, debido a que las pérdidas modeladas en ambos casos de estudios son la mismas; la resistencia del cableado de continua. Sin embargo, cabe destacar que este modelo es más realista debido a que se tiene en cuenta la unión entre alterna y continua mediante la incorporación del filtro.

Finalmente, en el último caso, al implementar los dos convertidores VSC, el modelo necesita inyectar más potencia activa. Desde un punto de vista energético parece inviable ya que se necesita más potencia de la red, pero esto se explica del siguiente modo: En los flujos de carga, se tiene en cuenta la pérdida asociada a la red de alterna, pero a diferencia del caso radial, en los casos del VSC y VSC filtro, se han mallado mediante a través de la línea de continua entonces, se aprovecha dicho mallado para inyectar menos activa. Siguiendo con

el análisis, la diferencia que se observa entre los dos casos de estudios previos y el caso de estudio VSCdoble, reside en el modelaje de las pérdidas acarreadas a los convertidores, al tenerlas en cuenta hace que el nudo *slack* tenga que inyectar más activa. Esto es muy significativo ya que las pérdidas de los convertidores influyen de manera significativa en la operación de los enlaces entre continua y alterna.

Caso de estudio	Potencia nudo <i>slack</i> (p.u)
Radial	53.613
VSC	51.867
VSCfiltro	51.942
VSCdoble	56.331

Tabla 2. Variable objetivo a minimizar red escala.

Se puede apreciar en la tabla 2, lo ya comentado en la ilustración 19, se han sumado los valores de potencia aportada por el nudo *slack* obtenidos para los 5 intervalos de tiempo. Como se puede observar, en el modelo radial, se ha obtenido un valor levemente superior comparado con los modelos posteriores, como ya se expresó con anterioridad, en los modelos VSC y VSC filtro aprovecha la línea auxiliar de unión para hacer ese trasvase de potencia activa entre cola y cabecera y así lograr el objetivo de minimizar la potencia del nudo *slack*. En cambio, en el caso de estudio del VSC doble, al modelar las pérdidas presentes en los convertidores tiene que inyectar más activa. Esto se refleja en los valores obtenidos en la tabla 2, el caso de estudio a tratar sale levemente superior a los anteriores casos expuestos. Pese a salir superior, dicho valor no es tan superior en comparación con los otros y se tiene un modelo mucho más realista en relación con los otros casos de estudios.

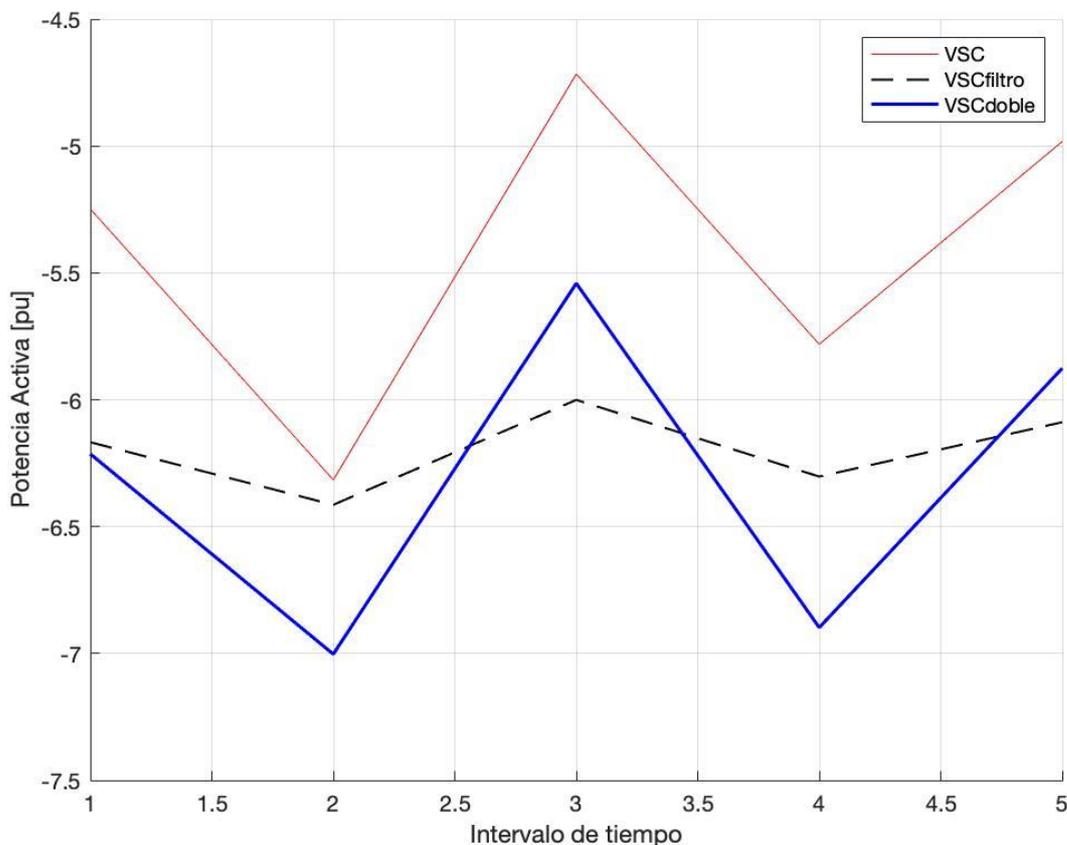


Ilustración 20. Potencia absorbida por el convertidor de cabecera.

Tras el análisis de las variables anteriores en la ilustración 20, se realiza el análisis de la potencia que mueven los convertidores en cada uno de los casos de estudio. En el caso del modelo radial, no se realiza un análisis ya que se trata de un modelo radial simple, por lo que se comienza por el estudio del primer modelo, que en este caso sería el enlace a través de un rectificador de onda completa. Como se puede observar, en este caso, cuando la demanda por potencia de las cargas es mayor, alcanza a un valor de -6.31 p.u, es decir, mueve hacia la cola una potencia activa de 6.31 p.u, y cuando se reduce la curva de la demanda de la carga, el convertidor también reduce tanto la demanda como su transferencia por la línea de continua a un valor de 4.71 p.u.

Comparando el análisis del modelo descrito junto con el siguiente, al incluir el filtro tras el convertidor de fuente controlada, el trasvase por la línea de continua al realizar el flujo cargas, es más ventajoso utilizar la línea de continua, aunque se modele una pérdida adicional, que sería el filtro de acoplamiento entre la red de alterna y continua, pero dicha pérdida no se vería afectada en el ajuste de activa. Aun así, se escoge la línea de continua para inyectar más potencia para así minimizar las pérdidas y que la potencia aportada por el nudo de cabecera sea menor, obteniendo un máximo de trasvase de potencia cercano a 6.4 p.u. Cuando la demanda de potencia es mayor, en cambio, reduce levemente la exportación en el tercer instante de tiempo y cae a un valor numérico de 6 p.u.

Finalmente, en el último caso de estudio, que más realista, se puede observar que el sistema aprovecha aun más el mallado de continua. Esto se puede apreciar en los valores obtenidos cuando la demanda de carga es mayor en el segundo instante de tiempo, llegando a un valor de 7 p.u, observándose que a medida que aumenta la demanda, aumenta la potencia movida por el convertidor a través de la línea de continua, y con respecto al caso anterior (VSC), también es mayor el valor cuando disminuye la demanda con un valor de 5.5 p.u este último efecto, es debido a que tienen que vencer las pérdidas que modelan ambos convertidores.

Este caso de estudio es muy interesante debido a que en este modelo se han contemplado las pérdidas de ambos convertidores y las pérdidas de la línea de alterna. Como se puede observar en la ilustración superior, para minimizar la potencia del nudo *slack*, el *OPF* hace fluir potencia activa por esta línea auxiliar más que en los otros casos de estudio debido a que utilizando dicha red, las pérdidas son menores.

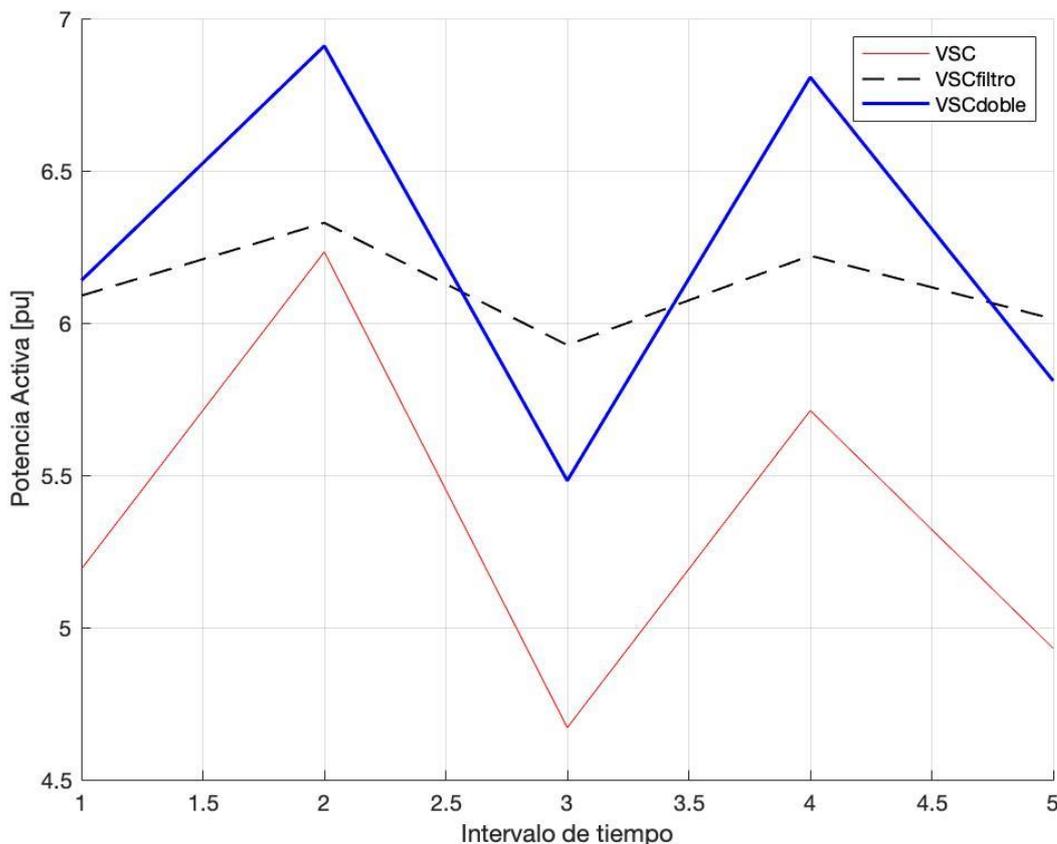


Ilustración 21. Potencia activa inyectada por el convertidor de cola.

Tras el análisis realizado por la potencia que mueven los convertidores de cabecera, en la ilustración 21 se analiza la potencia que mueven los convertidores situado aguas abajo de nuestro modelo. En el modelo de pequeña escala, la potencia aparente que maneja los convertidores VSC es de 8 p.u, o lo que es igual en magnitudes físicas 8 MVA. Tras la breve introducción, se realiza un análisis de los diferentes casos de estudio. En primer lugar, como se puede comprobar, es un análisis parecido al previamente descrito, a diferencia que en el caso previo era un análisis desde el punto de vista de consumo y ahora se realiza desde el punto de inyección de activa. En el segundo instante de tiempo, cuando había mayor transferencia de potencia por el convertidor de cabecera, debido al aumento de la demanda, llega al convertidor casi toda esa potencia activa, pero hay un porcentaje muy pequeño que se disipa debido a las pérdidas de la línea de continua. Se ve mucho mejor de manera numérica; se puede observar en la ilustración 20 que el convertidor transfería 6.73 p.u, mientras que en la ilustración 21, al convertidor situado aguas abajo del sistema llegan 6.64 p.u. Dicho esto, se puede decir que se disipan 0.082 p.u en este modelo por la línea de continua. Lo mismo pasa cuando se reduce el estado de carga de la red en el intervalo 3, el convertidor de cabecera absorbe 6.2 p.u y al convertidor de cola, le llega 6.12 p.u.

En este segundo caso el convertidor, como se pudo apreciar en la anterior ilustración, exporta más potencia activa por la línea auxiliar por lo que las pérdidas asociadas a la línea de continua van a ser levemente superior comparado con el caso de estudio previo. Ejemplificándose de manera numérica, el convertidor de cabecera absorbía 6.4 p.u y a la cola llegan cercano a 6.3 p.u, dicho esto, se disipan unos 0.085 p.u en pérdidas debido a la resistencia situada entre los nudos de continua (ilustración 13). Cuando el consumo de las cargas descienden en el instante de tiempo 3, el convertidor de cabecera absorbía 6 p.u, y a la cola llegan 5.92, es decir, unos 0.073 p.u de pérdidas de continua.

Finalmente, queda el último caso de estudio, el modelo con doble VSC. En este caso las pérdidas de transferencia serán aun mayores debido a que, además de la resistencia de continua, se modelan las pérdidas de ambos convertidores. Como se puede observar, el convertidor de cabecera absorbe 7 p.u y a la cola llegan 6.9 p.u, por lo que se disipan aproximadamente 0.1 p.u en pérdidas. Dichas pérdidas, se separan en pérdidas por el

modelado de continua y también debido a las pérdidas asociadas a ambos convertidores. Al igual que lo previamente comentado, al ser el trasvase mayor, mayor serán las pérdidas ya que circula más intensidad por la línea auxiliar. Este resultado es interesante porque en comparación de pérdidas, ambas están en un orden de magnitud muy parecido, lo que supone que este último de caso de estudio sea más realista que los previamente comentados ya que se modelan todas las pérdidas del sistema.

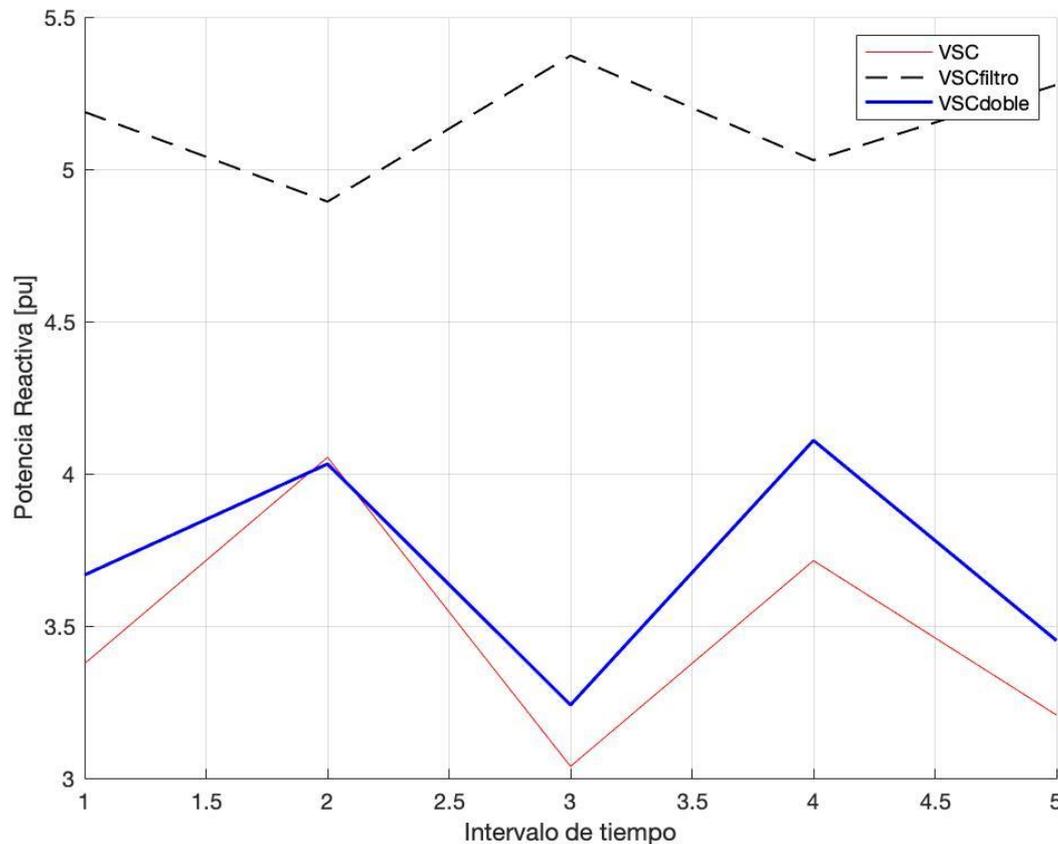


Ilustración 22. Reactiva aportada por los convertidores.

Tras el análisis de la potencia activa aportada por los convertidores situado en la línea de continua, en ilustración 22 se describe la potencia reactiva aportada por los convertidores situado en la cola del sistema, es decir, como se puede observar en el esquema unifilar, es el convertidor más cercano al nudo “4”.

Se va a realizar un análisis de los tres convertidores a la vez. Haciendo referencia a las ilustración 21, la inyección de reactiva estará ligada a la potencia aparente que mueven ambos convertidores, es decir, gobernará la restricción impuesta (2.2.3). Como se puede observar en la ilustración 22, el modelo rectificador de onda completa más VSC alcanza su máximo valor como es obvio, cuando es mayor la demanda de energía reactiva en el segundo instante de tiempo, llegando a un máximo cercano a 4 p.u, cuando el sistema reduce la demanda, se alcanza el mínimo a un valor cercano a 3 p.u.

A continuación, se analiza el siguiente caso de estudio. En este caso, al modelo anterior se le incorpora un filtro de acoplamiento, el cual está modelado por una reactancia, que consumirá aun más reactiva, por lo que el resultado mostrado en la ilustración 22 es lógico ya que, para aumentar las tensiones de los nudos, además de contrarrestar la reactiva que consume dicho filtro, el *OPF* tendrá que inyectar más reactiva. Dicho modelo alcanza su máximo en el tercer instante de tiempo con un valor de 5.37 p.u y su mínimo se alcanza en segundo instante de tiempo con un valor de 4.89 p.u.

Finalmente, en el último caso de estudio se tienen dos convertidores de fuente controlada, ambos convertidores pueden inyectar tanto activa como reactiva. Como se aprecia en la ilustración 22, este modelo de estudio está más cercano al caso ideal (VSC) debido a que en este caso de estudio ambos convertidores pueden inyectar

reactiva para subir las tensiones de los nudos del sistema, además como se ha visto en las ilustraciones 20 y 21, este es el modelo que más emplea la línea auxiliar de unión entre alterna y continua.

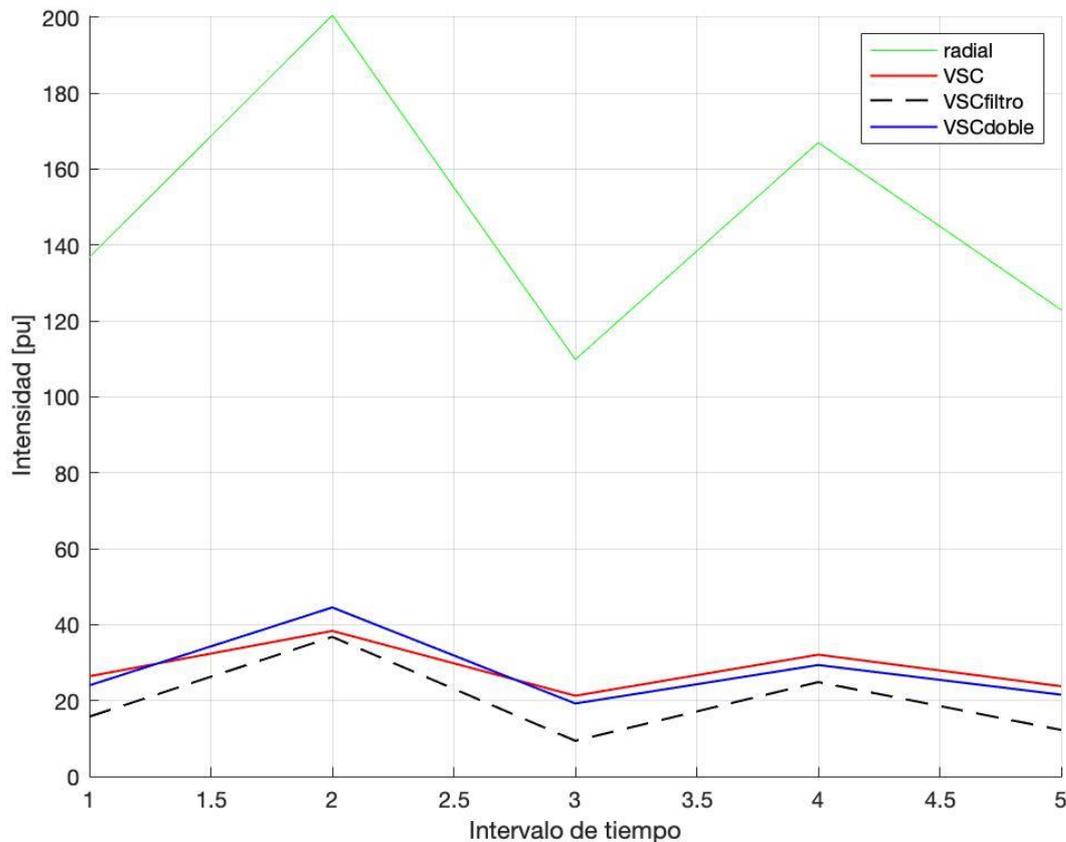


Ilustración 23. Evolución de la intensidad.

Finalmente, en la ilustración 23, la última variable a analizar en este modelo de pequeña escala es la intensidad de las ramas. Para este parámetro, se escoge la rama donde la intensidad sea más alta, es decir, la rama que este más sobrecargada, que en este caso está situado en la rama “1-2”, para ver cómo es su evolución en los distintos casos de estudio.

Primeramente, cabe destacar que, en el caso radial, la red tiene valores de intensidades muy altos, llegando a valores de 200 p.u. Sin embargo, tiene valores de tensión considerablemente bajos, por lo que se podría decir que la red está mal explotada. El sistema mejora notablemente mallándolo para así disminuir sus valores de intensidad y elevar la tensión.

Como se puede observar en el siguiente modelo de estudio, cuando se incorpora el VSC el sistema mejora considerablemente, obteniendo un máximo de 38 p.u, logrando que la rama no esté tan sobrecargada. A continuación, en el siguiente caso de estudio se incorpora el filtro, y como se puede apreciar en la ilustración, se consigue aun más reducir el valor de sobreintensidad que circula por dicha la rama “1-2”. Esto se puede explicar haciendo referencia a la ilustración 20; como se puede observar, aumenta la potencia circulada por la línea de continua, que es directamente proporcional a que circule menos intensidad por la línea de alterna y a su vez implica que vaya menos intensidad por la rama “1-2”, alcanzando su máximo en 36.7 p.u un valor relativamente cercano al caso anterior.

Finalmente, en el ultimo modelo de estudio se tienen en cuenta las pérdidas de ambas líneas y las pérdidas asociadas a sendos convertidores. Por eso en este modelo circula más intensidad por la rama “1-2”, debido a que al tener en cuenta las pérdidas del sistema, al *OPF* le es más favorable usar ambas líneas llegando a niveles muy cercanos al caso de estudio VSC. Dicho máximo se alcanza en el momento donde la demanda de cargas es mayor con un valor de 44.57 p.u, levemente superior a los previamente citados pero más realista debido a que se tiene en cuenta todas las pérdidas modeladas en el sistema.

4 VALIDACIÓN MODELO RED REAL

En este capítulo se van a implementar las ecuaciones vista en el punto 2, ya que se han modelado en un caso de una red de “n” nudos, ahora se van a extrapolar los resultados obtenidos a este modelo más realista representado en la ilustración 24, cuyos valores numéricos se ven reflejado en la tabla 4.2. Se van a realizar las mismas hipótesis, un estado de carga y generación y se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos.

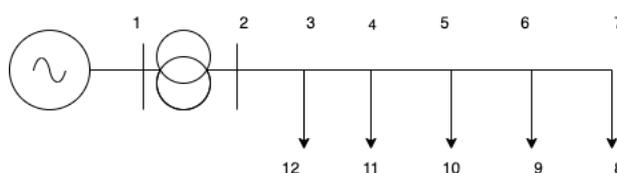


Ilustración 24. Esquema equivalente monofásico de la red real BT.

Inicial Bus	Final Bus	R(Ω)	X(Ω)
2	3	0.0933	0.0600
3	4	0.0454	0.0292
4	5	0.0922	0.0526
5	6	0.1505	0.0967
6	7	0.0437	0.0281
7	8	0.1692	0.0229
6	9	0.1757	0.0238
5	10	0.1767	0.0240
4	11	0.5343	0.0724
3	12	0.1977	0.0268
DC1	DC2	Rdc	$\sum_{i=3}^7 R(i,j)$

Tabla 3. Parámetros de la red de estudio.

4.1 Descripción de la red real

Como se puede observar en la ilustración 24, a diferencia del modelo de pequeña escala, la red analizada en el punto 3, era una red de media tensión, en este caso la red es de baja tensión. La diferencia se aprecia en el valor de la impedancia de la línea. En las redes de baja tensión, el valor de la resistencia es mucho mayor que

el de la reactancia. Esta red de baja tensión, es un modelo real, es la red del laboratorio del departamento de Ingeniería Eléctrica de la universidad de Sevilla, con una tensión base de 400 V y una potencia base de 100 KVA. Otra diferencia que se puede apreciar en el modelo, son el numero de nudos, en el anterior caso, se tenía con 4, en este caso se empieza con 12 nudos, de los cuales, se tienen 3 generaciones PV, que son los nudos “8”, “9” y “10”. En cambio, los nudos “11” y “12”, son cargas puras.

Como se puede apreciar, en el modelo a pequeña escala, se simula 5 intervalos de tiempos, en este modelo, se simulará un día entero y se analizará con detalle los puntos claves de este modelo. En la tabla 4.2, se puede apreciar los valores numéricos que componen la red de estudio, a diferencia de la red modelo pequeña escala, el modelo anterior era una impedancia que dependía de la distancia entre los nudos. Esta red presenta una impedancia fija entre los nudos que la unen.

Como se hizo en el modelo de estudio de pequeña escala, en esta red, también se empezará desde un caso base simple y se irán implementando y mejorando el modelo hasta llegar a un caso final. En este pequeño subapartado, se tratarán los casos de estudio y se hará un análisis detallado de todas las particularidades y mejoras que se implementaran al modelo respecto al caso anterior. Se utilizará el mismo tipo de solver que en el modelo previo, el solver llamado DICOPT y mediante este tipo de solver se usará la herramienta NLP que presenta para resolver variables que pueden estar sujetos a parámetros no lineales.

1. Caso radial (Radial): Es el primer caso de estudio, dicho caso pertenece a la ilustración 24 y al modelo matemático que se introdujo 2.1, se ejecutará el flujo de cargas y los resultados obtenidos por el *OPF*, servirán para compararlo con los siguientes casos de estudios al que se le irán incorporando mejoras. Este caso de estudio es interesante también para ver como mejora con respecto al último modelo, con todo incorporado y ver como el sistema ha evolucionado desde el primer caso hasta el final.

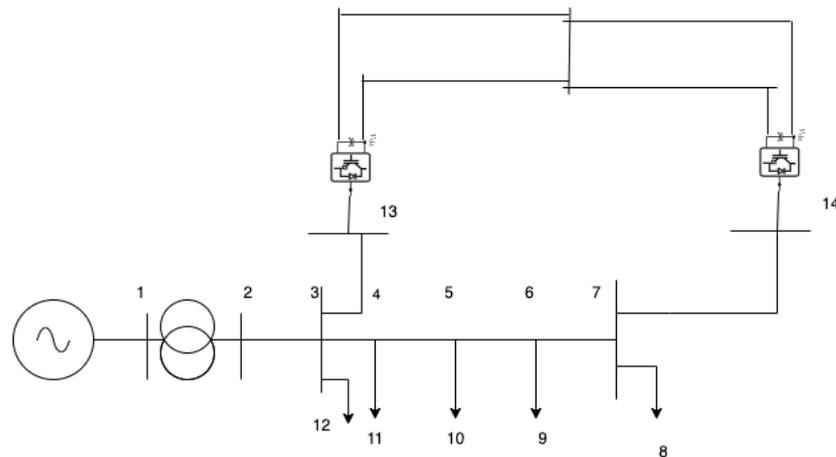


Ilustración 25. Esquema equivalente monofásico modelando formación back to back.

2. Modelo Back to Back (b2b): Este es el segundo modelo, que pertenece a la ilustración 25 y al modelo matemático 2.2. En este caso, se malla idealmente entre el nudo “3” y “7” a través de dos convertidores VSC. Como se puede observar en la imagen superior, los nudos “3” y “7” están unidos a unos nudos auxiliares llamados “13” y “14”. Se pueden observar que la conversión entre alterna y continua se realiza a través de convertidores VSC y unidos idealmente a través de una línea sin pérdidas. En este caso, no se tiene en cuenta la línea DC ya que al no modelar pérdidas, la potencia que mueve el convertidor situado en el nudo “13” es igual a la potencia que mueve el convertidor situado en el nudo “14”. La idea principal, es ver como se comporta la red mallando idealmente el sistema a través de dos convertidores VSC en formación back to back. El objetivo del *OPF* es minimizar las pérdidas del sistema, para ello se analizarán la potencia activa y reactiva aportada por los convertidores en los nudos donde esten situados.

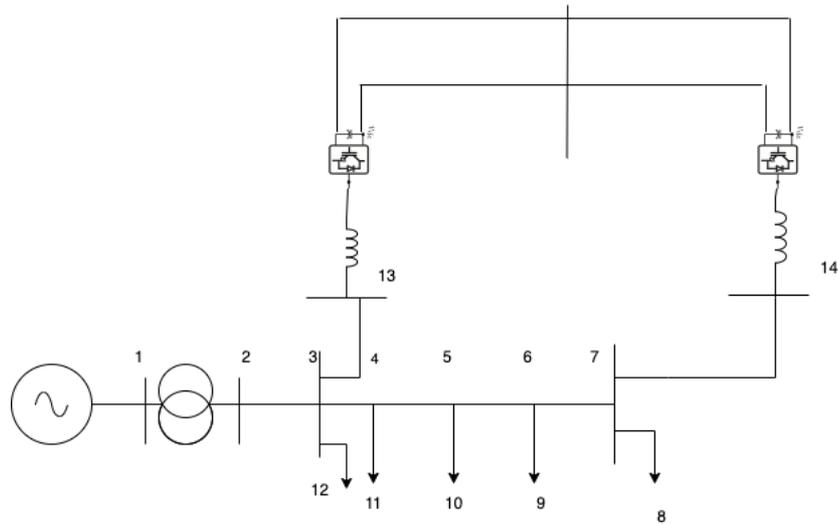


Ilustración 26. Esquema equivalente monofásico modelando formación back to back más pérdidas.

3. Modelo Back to Back pérdidas(b2bp): En este tercer modelo de estudio, representado en la ilustración 26 e introducido previamente en el modelo matemático 2.3, es un modelo adicional al descrito en el punto anterior, incluyendo el efecto que producen las pérdidas en el sistema. Como se puede observar en la imagen superior, las pérdidas se modelan a través de la inductancia que representa el filtro del convertidor, además del modelado de las pérdidas asociadas a ambos convertidores. Para ver la evolución de los modelos, se analizará la potencia activa y reactiva de ambos convertidores y su respectivo impacto en la potencia aportada en el nudo *slack* y la intensidad de la rama más sobrecargada.

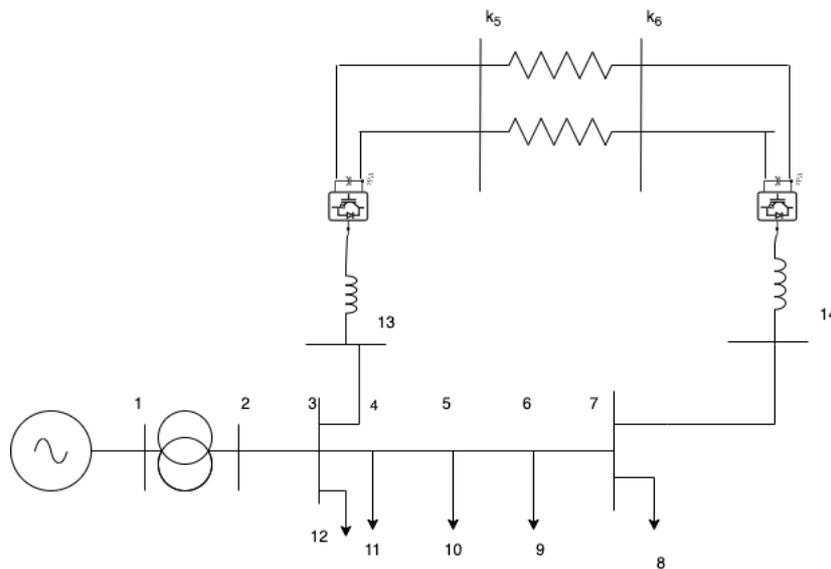


Ilustración 27 Esquema equivalente monofásico formación back to back más línea DC.

4. Modelo Back to Back pérdidas línea DC (b2bpd): Tras añadir las pérdidas en el tercer caso, finalmente, en la ilustración 26 y como se vió en el modelo matemático 2.4 se finaliza el mallado con la suma de la línea de continua. Haciendo una recapitulación de como esta el sistema, se tiene: el sistema radial del caso base, al que le se le han añadido dos nudos adicionales “13” “14”, al nudo se han implementado dos convertidores de fuente controlada con sus impedancias de filtro y sus respectivas pérdidas. Finalmente, se han modelado la línea de continua, a través de dos nudos, el “ k_5 ” y el “ k_6 ”, por donde circula la potencia de continua y el nudo “ k_6 ” se tiene como el bus de continua.

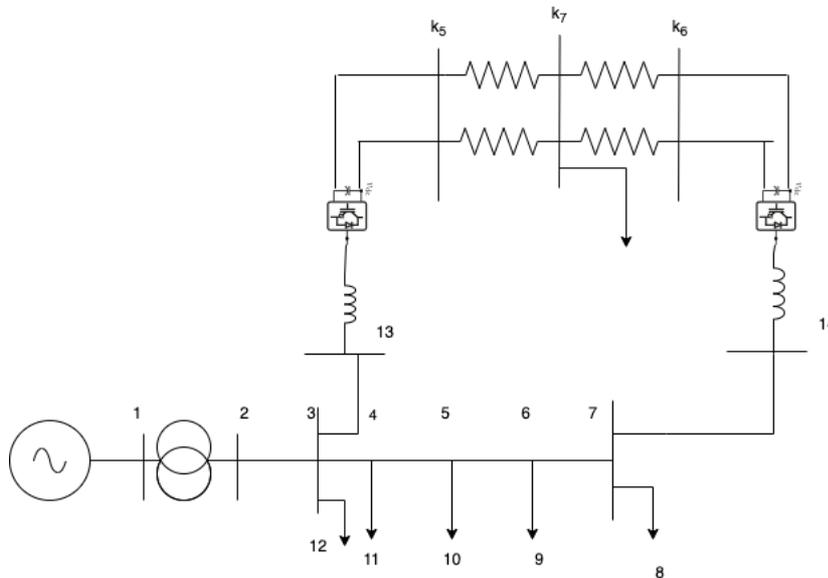


Ilustración 28. Esquema equivalente monofásico formación back to back inyección intermedia.

5. Modelo Línea intermedia DC: Finalmente, el último caso de estudio representado en la ilustración 28 y modelado matemáticamente en el punto 2.5, se propone un caso adicional, a la línea intermedia se añade un nudo intermedio que trate de inyectar por dicho nudo un porcentaje de la generación fotovoltaica, y ver como repercute esta novedad en el sistema. Como se puede observar, el nudo intermedio, es el nudo “ k_7 ” y se ha modelado la resistencia de continua, se ha escogido la resistencia de los casos de estudios previos y se ha dividido entre dos su valor, para que así el nudo “ k_7 ” quede a la misma distancia del nudo “ k_5 ” que del nudo “ k_6 ”. Finalmente, la inyección comentada previamente, es la carga conectada al nudo “ k_7 ”, es una carga “positiva”, es decir desde el punto de vista del análisis de potencia, inyecta al nudo potencia activa. Para este estudio, se realiza tres tipos de simulación, una primera que será un 80% por la red de alterna y un 20% por la red de continua, otra que va a ser un 60% y un 40% y finalmente un último caso que será el 50%, se repartirá por la mitad ambas potencias.

4.2 Análisis de los resultados

Tras las descripciones de los modelos descritos previamente, en este punto se van a describir los resultados obtenidos de las variables de estudio tras ejecutar el flujo de carga y *OPF* de todos los casos estudiados. De esta forma, ver la evolución de los modelos y la mejora que supone la incorporación de toda y cada una de las variables a tener en cuenta que supone desde el caso radial hasta la incorporación y modelado de la línea de continua.

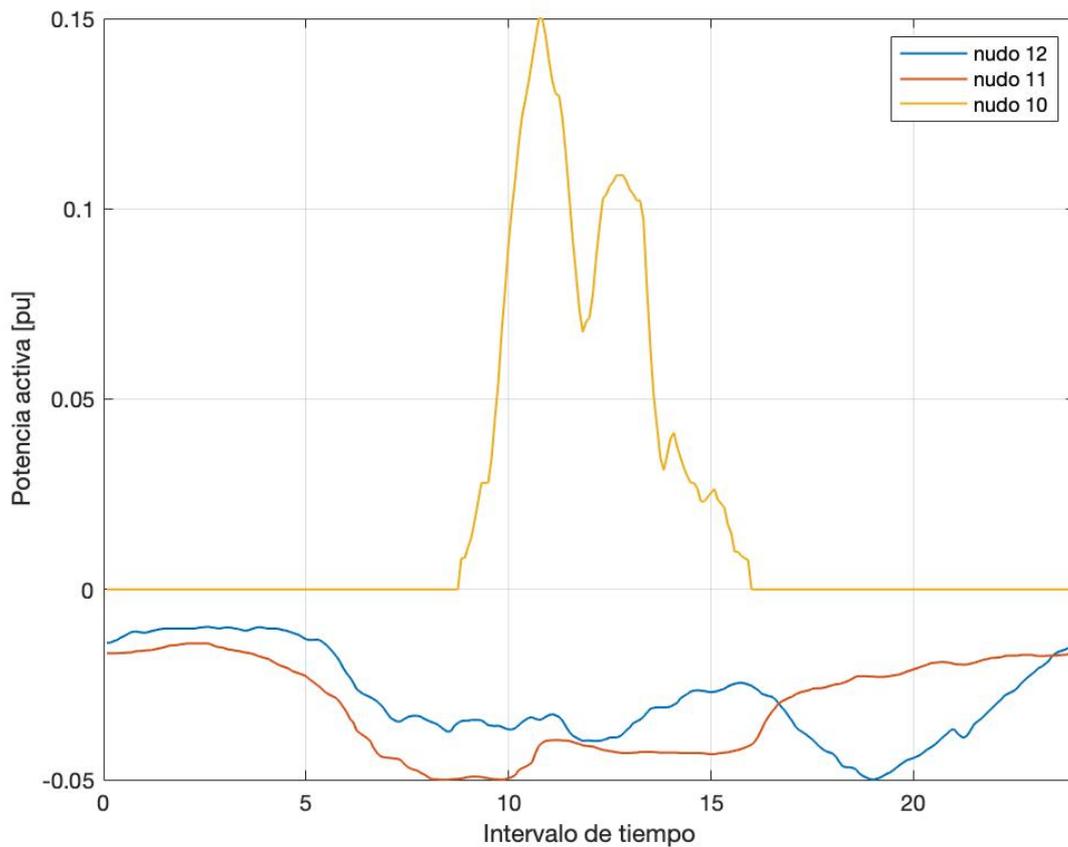


Ilustración 29 Perfil de activa generación o consumo.

Para saber cómo va a evolucionar la red, es importante conocer los estados de carga y generación que se tienen en los nudos, para así poder relacionarlos con los resultados que se tienen a posteriori tras ejecutar el flujo de carga. Primero se analiza el perfil de activa, representado en la ilustración 29. Cabe destacar que los colores azules y rojos simbolizan cargas, eso explica que den valores negativos. Como se puede observar son cargas que están en funcionamiento durante las 24 h de la simulación, por lo que para combatir la alta demanda que se representa entre los nudos “11” y “12”, se tiene generación PV instalada en los nudos “8, 9 y 10”. La generación de estos es idéntica, por lo que se ha representado como ejemplo de gráfica el nudo “10”.

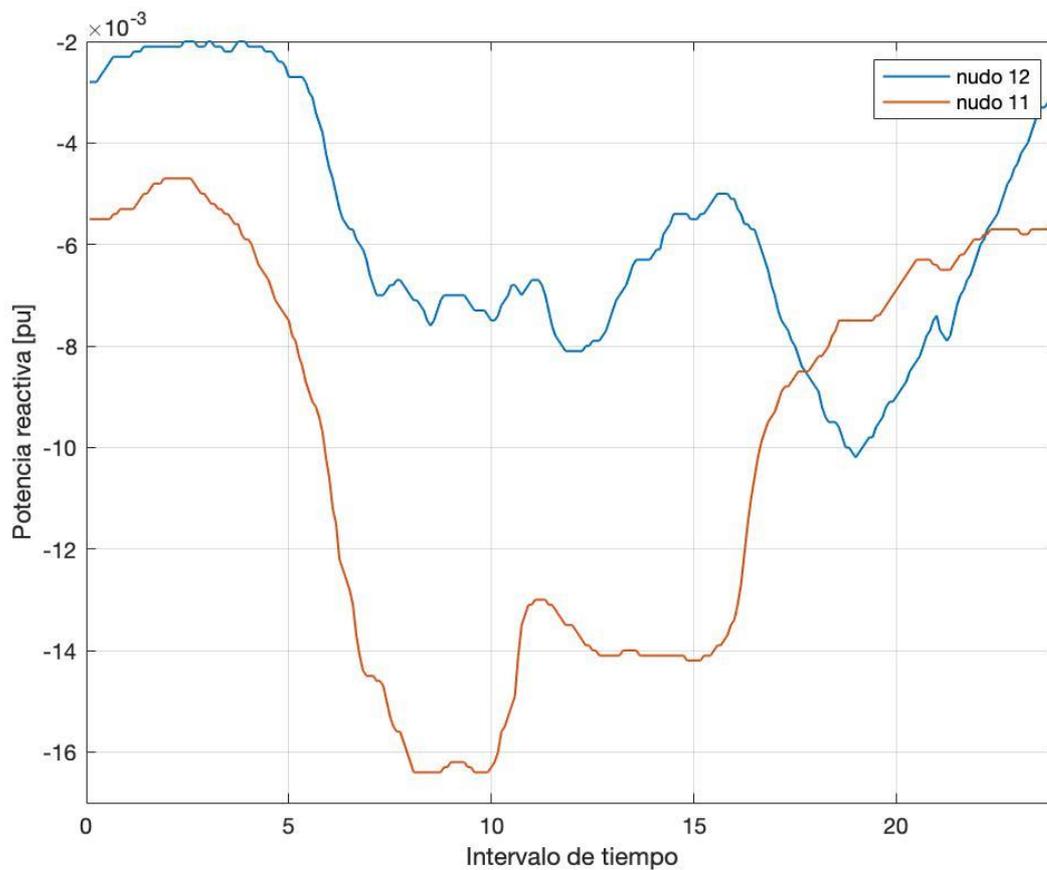


Ilustración 30. Evolución de la potencia reactiva en las cargas.

El siguiente análisis, tras el consumo de activa, queda el consumo de reactiva, representado en la ilustración 30, que es un perfil muy similar al de la activa, se tiene consumo durante las 24 h de simulación, y los máxipérdidas de ambas cargas se encuentran en los mismos periodos que en los máximos de la activa, para la carga situada en el nudo “11”, entre las 10 h, después es relativamente constante, hasta que finalmente reduce considerablemente su consumo, sin embargo con respecto a la carga situada en el nudo “12”, tiene un consumo más o menos constante a lo largo del día, excepto cuando aumenta su consumo en torno a las 19h que alcanza su máximo, pero es considerablemente inferior con respecto a su carga homóloga situada en el nudo “11”. Para finalizar el análisis de los perfiles, a diferencia del anterior análisis, como se puede observar los paneles no inyectan reactiva, debido a que se ha fijado el factor de potencia 1. El balance de inyección y consumo de reactiva se hará a través de los convertidores de fuente controlada y el nudo generador.

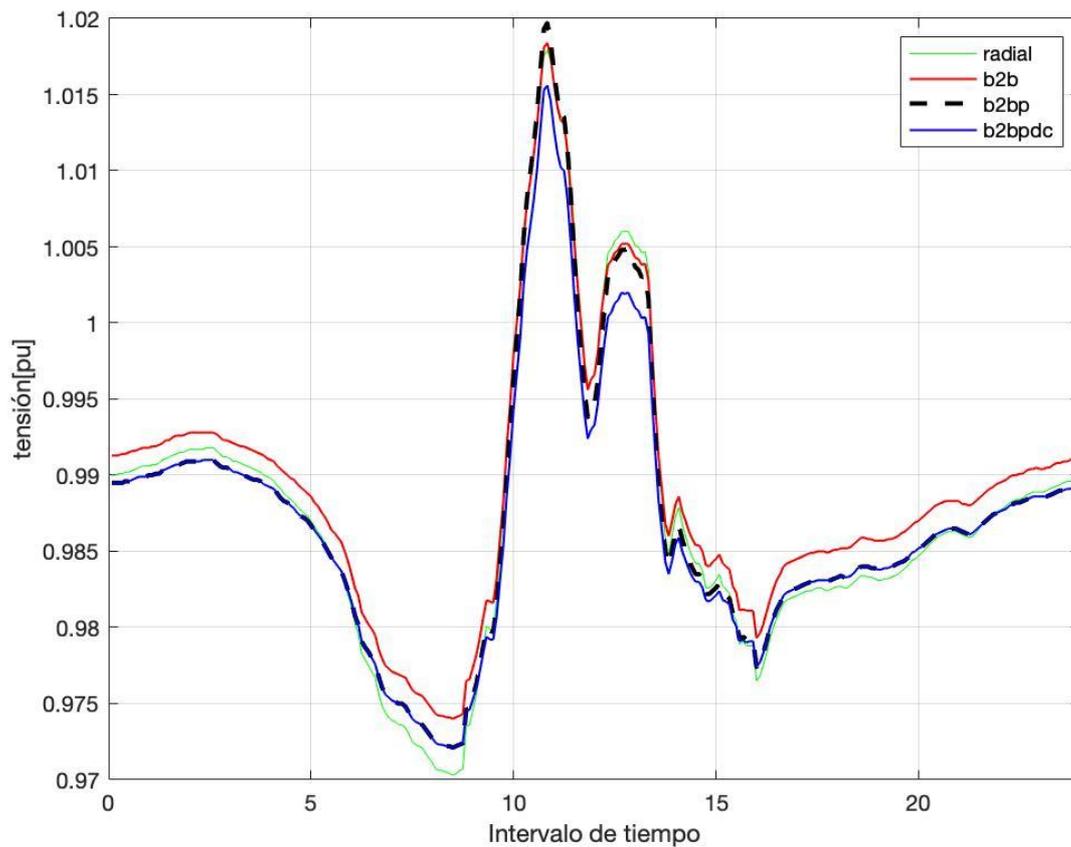


Ilustración 31 Evolución de la tensión del nudo 11.

Una vez ejecutado los flujos de carga y el *OPF* de los casos de estudio, se van a analizar en la ilustración 31 como las tensiones de los nudos que se ven afectadas. En primer lugar, se va a estudiar la tensión del menor valor alcanzado a lo largo de las 24 h del día. El mínimo valor de tensión se encuentra en el nudo “11”, para el caso radial. Como se observa en la ilustración 31, se alcanza un valor de 0.970 p.u en torno a las 9 h, y un valor máximo de 1.018 p.u cerca de las 11 h. Como ya se vió en la red de pequeña escala, se irá analizando si en los distintos casos de estudio se va consiguiendo un perfil más plano de tensiones.

Tratando ahora el segundo caso de estudio (b2b), a las 9 h se consigue un valor de tensión de 0.974 p.u y el punto máximo de tensión se consigue a las 11 h con un valor muy similar al caso radial. Dicho esto, se puede empezar a observar la estabilidad en tensiones, ya que a pesar de que el máximo es muy similar en ambos casos, el mínimo entre el resultado radial y el back to back ideal es distinto, en este caso se ha logrado subir la tensión en el back to back.

Se analiza ahora el tercer modelo de estudio, que corresponde al b2bp. En este caso el valor mínimo de tensión es más bajo que en el anterior, ya que se produce a un valor numérico de 0.972 p.u y el máximo que se consigue es mucho mayor con respecto al anterior, a 1.019 p.u. Como se puede observar, este modelo tiene mayor caída de tensión ya que la diferencia entre el punto de mayor y menor tensión es más elevada que en el caso previo.

Finalmente, en el último caso de estudio (b2bpdcc) se puede observar en la ilustración que el valor mínimo de tensión coincide con el caso previo. A las 9 h obtiene un valor de tensión de 0.972 y finalmente el máximo valor se obtiene a las 11, con un valor de 1.015 p.u. Haciendo un análisis con respecto al caso de estudio anterior, se obtiene un valor de tensión menor al que se está modelando en la línea de continua. Dicho modelaje hace que la tensión se reduzca considerablemente y así obtener mejor perfil en tensiones, por lo cual no solo mejora al modelo anterior sino también a todos los casos estudiados previamente.

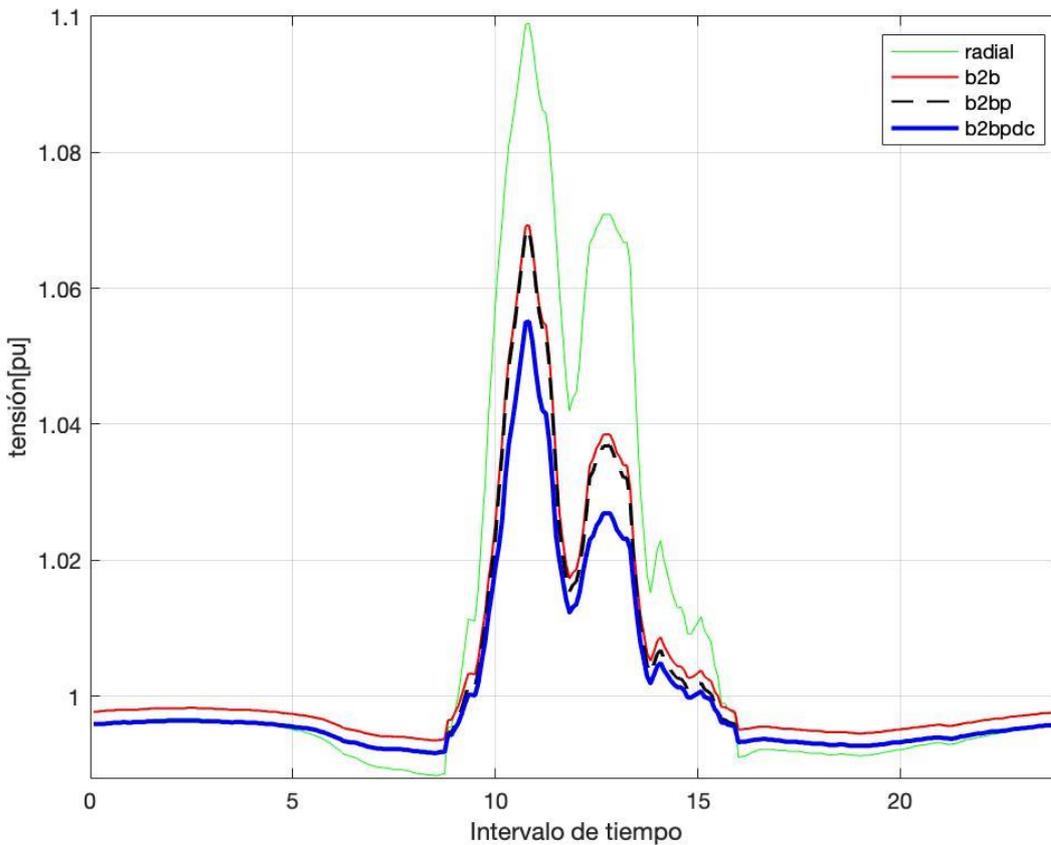


Ilustración 32. Evolución de la tensión del nudo 8.

Como se hizo con el punto de mínima tensión obtenido en el caso radial, ahora en la ilustración 32, se trata otro caso extremo, el punto donde en el caso radial simple se obtuvo el mayor valor de tensión en p.u. En este caso, se trata del nudo “9”, dicho valor se obtiene en torno a las 11 h y un valor numérico en torno a 1.1 p.u., al igual que el caso anterior también es muy interesante, hacer un análisis entre el punto con mayor tensión y el punto con menor tensión, para así ver lo estable y lo fuerte que se consigue hacer a dicha red. Como se puede observar, ahora en el modelo de estudio radial, el punto con menor tensión se obtiene a un valor aproximado de 0.98 p.u., entorno a las 8 h, a medida que se va mejorando la red e incorporando las mejoras al modelo, se va mejorando la estabilidad del sistema, subiendo la tensión del valor más bajo y reduciendo el pico de máxima tensión que se obtiene.

Se avanza el análisis del sistema, tratando ahora modelo back to back, se logra reducir el pico de máxima tensión que se produce a las 11 h, a un valor de 1.07 y se consigue el segundo análisis muy interesante, se logra un perfil de tensiones, subiendo la tensión del valor más bajo a un valor de 0.993 p.u. Como se podría observar la diferencia entre ambos valores es menor que en el caso previo.

Se avanza en el análisis con la incorporación de las pérdidas del sistema, este modelo se representado en la ilustración 32, con líneas intermitentes negras, que como se aprecia, no es un modelo en el que consigue mejorar al caso previo debido a que primero se consigue un valor numérico de sobretensión igual que el caso de estudio b2b, pero se obtiene un valor de tensión menor que en el caso previo a un valor de 0.988. Dicho esto, se mejora la estabilidad en tensiones con respecto al caso radial, pero se empeora frente al caso back to back ideal. Finalmente, al incorporar la línea de continua, como se puede observar, el caso b2bpdcc, el pico de mayor sobretensión mejora frente a los otros casos, disminuyendo su valor a 1.055 p.u., y el valor de mínima tensión se consigue disminuir a un valor igual que en el caso previo de estudio 0.988 p.u.

En este análisis, con respecto a los otros casos estudiados, se consigue mejorar el perfil de tensiones con la incorporación de la línea de continua y el modelado de sus pérdidas, ya que como se ha apreciado, en ambos casos se puede lograr subir la tensión del punto mas bajo y reducir la tensión del punto mas alto y así lograr

que la red sea más fuerte a las fluctuaciones que puedan lograrse en la red y ser mucho más estables a ella. Finalmente comparando el caso radial con los modelos posteriores se logra solucionar los problemas de sobretensiones en los nudos estudiados a través de el enlace de continua.

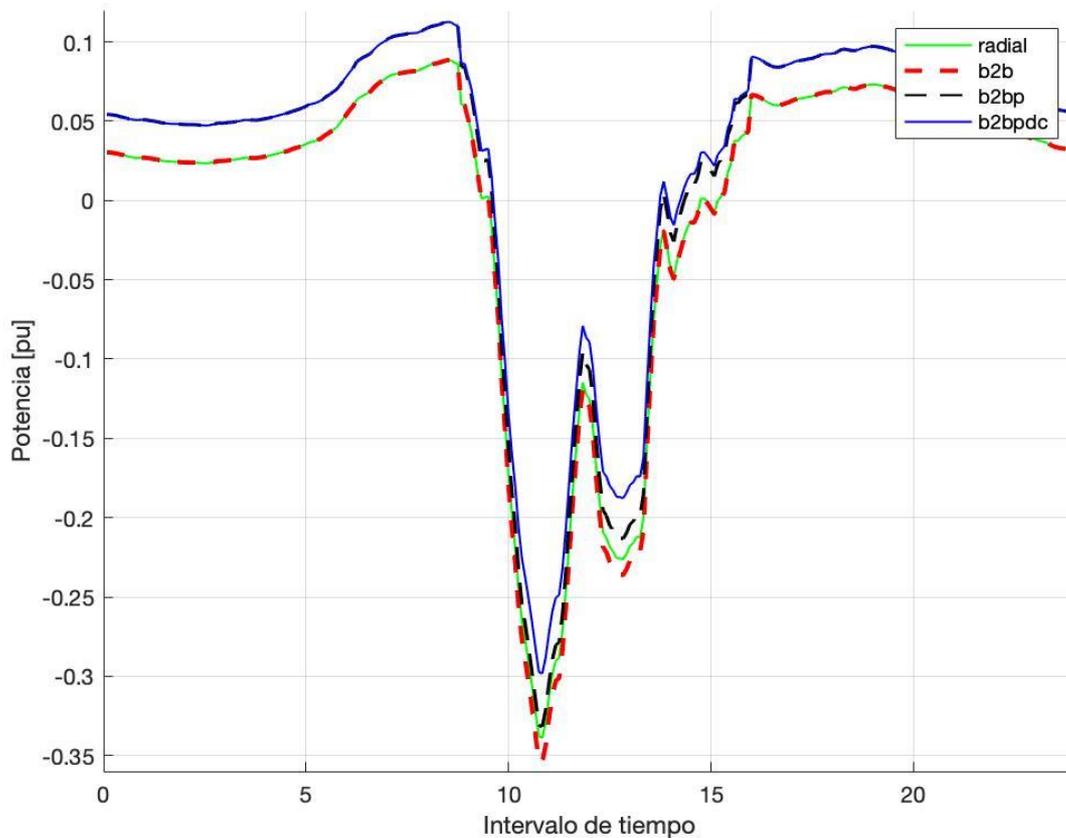


Ilustración 33. Evolución de la potencia aportada por el generador.

Se avanza con el análisis de los modelos, ahora con el balance de la potencia aportada por el nudo *slack* representado en la ilustración 33, como se puede apreciar es una variable crucial para analizar, ya que al fin y al cabo es la variable que se trata de minimizar.

Primero, se estudia la potencia que inyecta el nudo *slack* para el caso radial, como se puede comprobar, coincide en muchos periodos con el modelo del caso del back to back ideal, ya que son dos modelos en los que no se han incluido las pérdidas. Empiezan aportando activa al modelo de manera ascendente, hasta que aproximadamente en torno a las 9 h, se puede apreciar un fenómeno que no se observa en el modelo a pequeña escala, ahora la potencia no es aportada, es absorbida, o sea que con la generación fotovoltaica se gana bidireccionalidad con la generación del nudo *slack*. No solo se consume, si no que los excedentes de activa se evacúan por el nudo 1, hasta un máximo que como se puede observar en la imagen de 0.339 p.u. Además, como se puede observar en la ilustración 29, los instantes de tiempos que coinciden con el periodo donde la generación fotovoltaica esta exportando potencia activa.

Continuando con el análisis del siguiente modelo, ahora se tiene mallada la red con los convertidores VSC en formación back to back. Como se comentó en el anterior análisis, el generador empieza aportando potencia activa, hasta llegar a un máximo de 0.088 p.u sobre las 9 h. A partir de ahí, la generación fotovoltaica comienza a inyectar activa en los nudos “8, 9 y 10”. Como ahora se tiene un mallado ideal entre la cola con la cabecera a través de los nudos “3” y “7”, el OPF, para minimizar la potencia aportada por el nudo *slack*, utilizará dicha línea de continua ideal para minimizar las pérdidas.

Como se puede observar en la ilustración 33, la diferencia que existe entre el modelo radial y el back to back es el mínimo que se encuentra cercano a las 10 h, debido a que se aprovecha esta unión para así poder absorber activa hasta un máximo de 0.354 p.u. Tras un primer análisis de ambos resultados obtenidos, se ha logrado

exportar más a red mallando el sistema, dicho esto se verá como evolucionará esta exportación en los modelos que se tienen a continuación.

Se continúa con el análisis de la potencia aportada por el generador, que en este caso se modela el de los convertidores. Se observa a continuación que debido a dichas pérdidas, el nudo *slack* empieza aportando más activa con respecto a los casos anteriores. En datos numéricos, con respecto al anterior caso, el nudo *slack* aportaba 0.03 p.u y ahora con los nuevos parámetros a tener en cuenta, inyecta en torno a 0.05 p.u, por lo que las pérdidas suponen que el nudo *slack* tenga que aportar 0.02 p.u. de más. A la hora de producir la generación fotovoltaica, se obtienen menores valores de exportación al nudo *slack* debido a las pérdidas, sobretudo a las pérdidas relacionadas a los convertidores, ya que, si se minimizan pérdidas, el *OPF* escogerá la línea de continua, dado que en este caso de estudio no se modelan estas pérdidas.

Finalmente, en el último caso de estudio se malla el sistema modelando las pérdidas asociadas a la línea de continua. Durante el primer tramo de simulación, como se puede observar en la imagen, no tiene mucha diferencia con respecto al caso previo de estudio. Haciendo referencia a los colores asociados a cada uno de los casos de estudio, la línea negra discontinua queda superpuesta a la azul oscura durante las primeras horas de simulación hasta que, como ocurre con los casos previos de estudio, cuando comienza a producir la generación fotovoltaica, ambos casos se separan. Esto se puede entender haciendo un análisis numerico; cuando se alcanza la mayor exportación al nudo *slack*, en el caso previo (b2bp) se consigue un máximo de 0.332 p.u y en este caso de estudio, se consigue 0.298 p.u . La diferencia se aprecia en el modelado de las pérdidas asociadas a la línea de continua.

Caso de estudio	Potencia del nudo <i>slack</i> (p.u)
Radial	0.3486
b2b	-0.1128
B2bp	6.7309
B2bpdc	8.1143

Tabla 4. Variable objetivo a minimizar red real.

En la tabla 4, se puede observar la variable a minimizar. Se ha cogido la potencia aportada por el nudo *slack*, se ha realizado el sumatorio para todo el intervalo de simulación y dicha variable se ha minimizado. Cabe destacar, que el caso más favorable como se realizó en el análisis de la ilustración 33 es el modelo back to back, debido a que no se estaban modelando las pérdidas dicho valor sale bastante inferior a lo demás casos de estudio.

Siguiendo con el análisis, en el caso del modelo back to back con pérdidas, al modelar las pérdidas de los convertidores, el resultado obtenido en este caso es ligeramente superior al caso ideal. Resultado lógico debido a que como ya se observó previamente no se exportaba tanta cantidad a red y en el comienzo de la simulación el nudo *slack* tenía que importar más activa con respecto a los casos anteriores. Finalmente, en el caso del modelo final (b2bpdc), se observa lo ya comentado previamente, al ser un modelo más realista y al modelar la línea de continua el nudo *slack* tiene que aportar más activa, como se observó en la ilustración 33, el nudo *slack* tiene que aportar más activa y a la hora de exportar, no se exporta tanto como en los casos previos, esta es la diferencia que se puede observar entre el modelo b2bp y b2bpdc.

Como conclusión final a la tabla 4, se observa que al mallar la red con los convertidores y modelando dichas pérdidas se puede observar que en la red modelo no saldría tan rentable mallarla debido a que las pérdidas de los convertidores absorben tanta cantidad de activa que hace que el nudo *slack* tenga que inyectar más activa y el sumatorio para todos los intervalos de tiempo salga bastante más elevado comparado con el caso base. Este solo es un caso particular para este tipo de red, una red de baja tensión donde la resistenci no es muy superior a la inductancia entonces las pérdidas de la línea no serían tan elevadas.

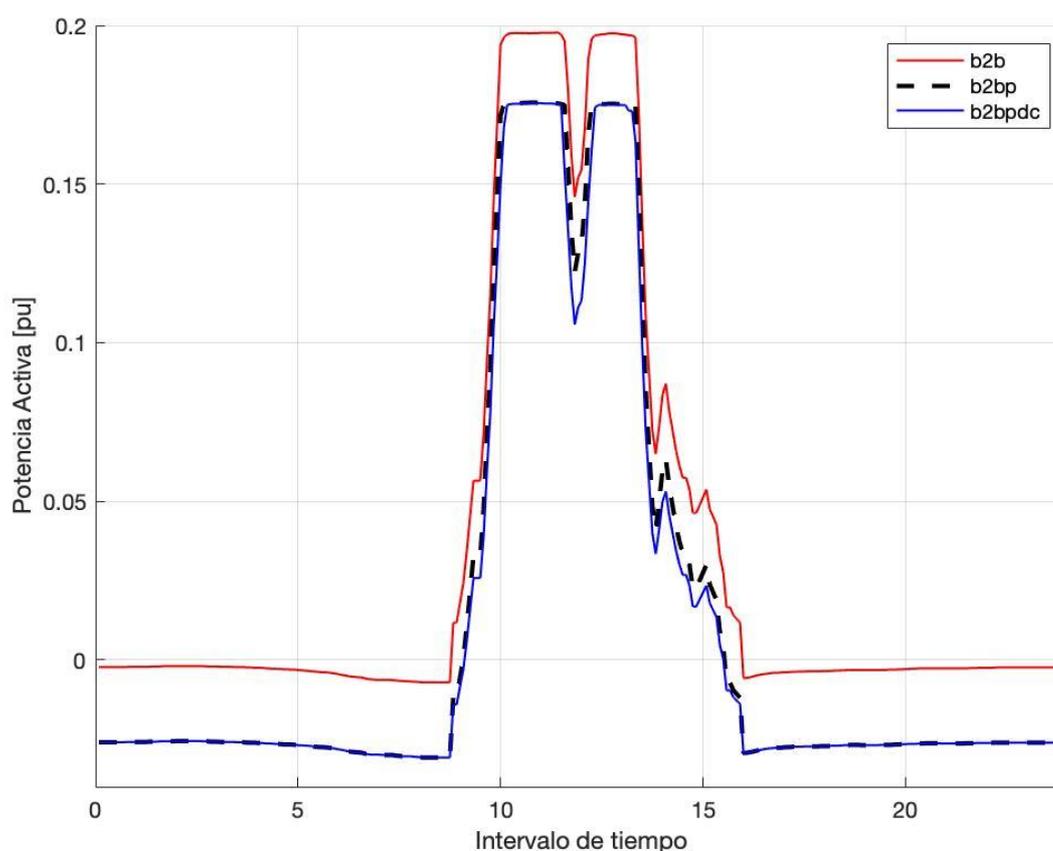


Ilustración 34. Evolución de la potencia del convertidor de cabecera.

Tras el análisis de la potencia aportada por el generador, ahora se analiza en la ilustración 34, la potencia aportada por los convertidores. En este caso, representa el convertidor situado en el nudo más cercano a la generación, como se puede observar, durante el primer intervalo de tiempo, el convertidor está absorbiendo potencia, para inyectarla a través de la línea de continua y llevarla a la cola. Se produce un salto entre los modelos del back to back ideal y los otros dos restantes. Esto es debido a como ya se ha mencionado antes, en los modelos posteriores se han tenido en cuenta las pérdidas, entonces esa diferencia hace que, en los demás casos, haya más flujo de potencia para vencer dichas pérdidas. Como se vio en el análisis de la potencia aportada por el generador y en la ilustración del estado de carga y generación en los nudos “8, 9, 10, 11 y 12”. A partir del intervalo de tiempo situado entre las 10 h aproximadamente, el convertidor empieza a hacer tener un comportamiento muy interesante, empieza a inyectar activa en la cabecera. Como se puede observar, en el caso de back to back, el convertidor logra transportar mucha más activa por la línea, otro análisis que se puede sacar en este estudio, que hay que tener en mente que se tienen dos convertidores iguales de 20 kVA, o lo que es igual a 0.2 p.u.

Analizando la ilustración se va a tratar el modelo back to back ideal, el convertidor por poco pero no llega a 0.2 p.u y se queda en un valor constante de 0.197 p.u, aquí el inversor está sujeto a la restricción del triángulo de potencias ya comentada previamente en la ecuación (2.2.3). Durante todo el intervalo de tiempo de la generación fotovoltaica el inversor está inyectando plena potencia, después dicha inyección va reduciéndose progresivamente hasta que el inversor vuelve a su estado natural y vuelve a absorber potencia para inyectarla a la cola.

Al igual que en los dos casos de estudios (b2bp y b2bpdc), el convertidor satura a un valor de 0.175 p.u, la diferencia que se observa entre los casos de estudio b2bp y b2bpdc, reside en que el modelo back to back más línea de continua es más sensible a fluctuaciones de potencia por la generación PV. Ejemplo gráfico, en el instante de tiempo igual a 12h, hay una leve fluctuación en la generación PV, disminuye su inyección a la red debido a las pérdidas modeladas en la línea de continua, al igual que se puede observar en los últimos tramos de generación PV en torno a las 15 h.

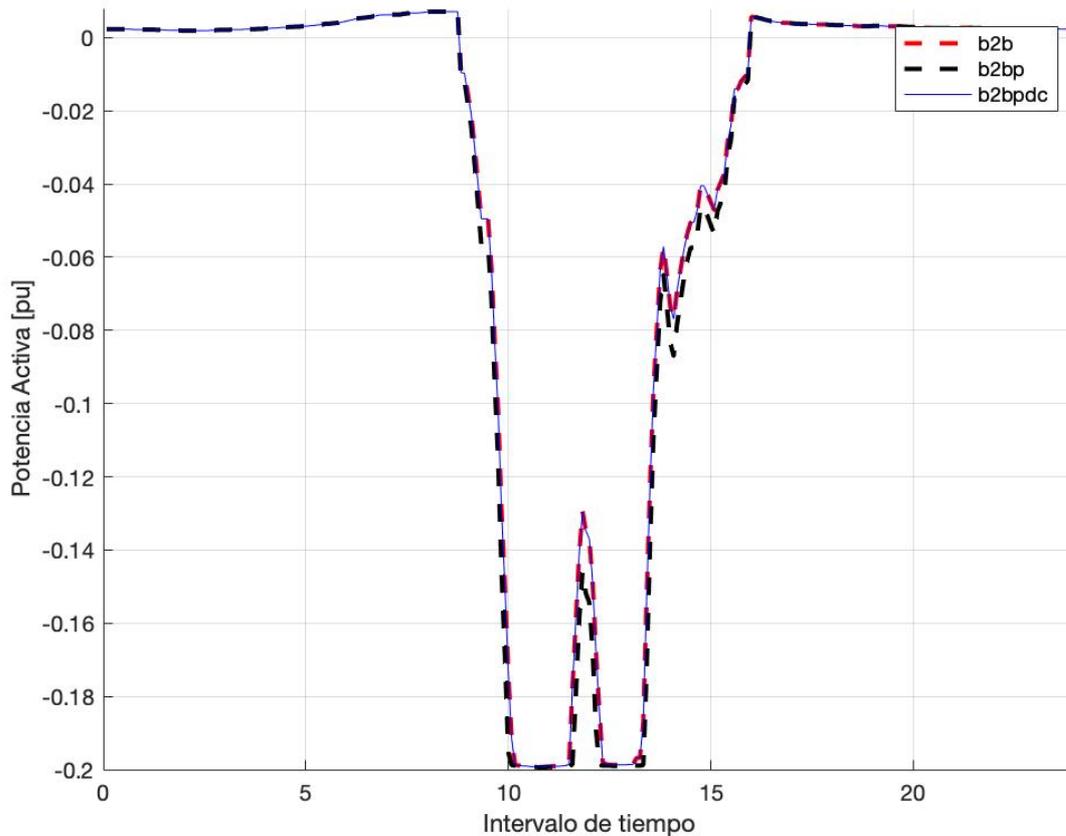


Ilustración 35. Evolución de la potencia activa del convertidor de cola.

Siguiendo con el análisis de los casos de estudio, tras realizar el análisis del convertidor de cabecera, ahora se analiza en la ilustración 35, el convertidor situado en el nudo “14”. Como se puede observar, al convertidor de cola, le llega la misma potencia en los tres casos de estudio, es decir tras ejecutar los flujos de carga, el objetivo del *Optimal power flow*, para minimizar la potencia del nudo *slack* y mantener la estabilidad en tensiones, trata de que al convertidor de cola le llegue la misma potencia en los tres casos. Siguiendo el análisis, desde el punto de vista del convertidor de cabecera, en el caso ideal tiene que inyectar lo mismo que se va a consumir en la cola, debido a que no existen pérdidas que disipen esa potencia por la línea DC. Ahora bien, en los modelos siguientes, como se pudo apreciar ya en la ilustración 34 existe una diferencia entre el modelo back to back y los siguientes casos de estudio, esto es debido a las pérdidas que se modelan en los casos de estudio, para que llegue la misma potencia que en el caso ideal, se tiene que inyectar más potencia para vencer dichas pérdidas.

Como se puede notar al igual que pasa en el convertidor de cabecera, en este convertidor se puede apreciar también la saturación que está sufriendo debido a la restricción del triángulo de potencias que liga las tres variables del convertidor: potencia aparente, activa y reactiva. En el instante de tiempo igual a las 12 h, cuando se produce esa fluctuación en la generación PV, en el caso del back to back ideal y el caso del modelado de la línea de continua, se produce una disminución brusca en la inyección a cabecera, efecto que no ocurre en el caso back to back más pérdidas. Esto explica lo ya comentado previamente, en el caso back to back más la línea DC, es más susceptible a cambios de inyección de potencia.

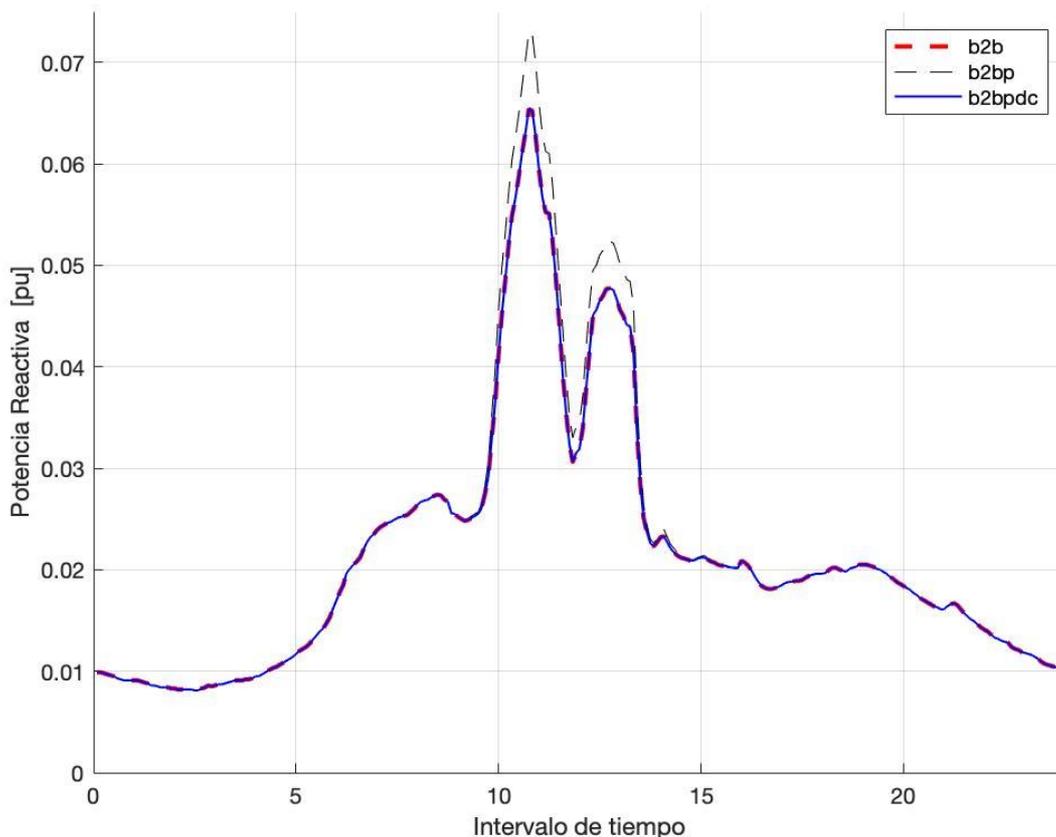


Ilustración 36. Evolucion de la potencia reactiva convertidor de cabecera.

Tras el análisis de la potencia activa aportada por cada convertidor, en la ilustración 36, se analiza la potencia reactiva de dichos convertidores, para así entender mejor que ocurre en cada momento y como repercute dicha acción en el comportamiento total del sistema. Primero, se analizará el comportamiento de los casos de estudio back to back y el modelo de línea de continua, como se puede ver en la ilustración, ambos modelos quedan superpuestos y su análisis sería similar.

Como se puede apreciar, en todo momento el convertidor está inyectando reactiva al modelo para así subir las tensiones y hacer que dichas tensiones pese al consumo de reactiva estén lo más cercanas posibles a 1 p.u. Como se puede observar, en la imagen hay un máximo de inyección de reactiva, cuyo valor es de 0.065 p.u. que se produce cercano a las 11 h de simulación, apoyándonos en la ilustración de la inyección 34 del convertidor de cabecera, es el instante donde la generación PV de los nudos auxiliares, está aportando inyectando el máximo de activa. Dicho esto, hay un exceso de activa del convertidor y este evacua por la línea de continua este exceso de potencia para si exportarlo a red. Como hay exceso de activa y las cargas siguen consumiendo reactiva, el convertidor de cabecera aporta esta reactiva que demanda las cargas para así subir la tensión de los nudos colindantes.

Como se puede observar en la imagen, el modelo que simboliza la línea discontinua negra es el modelo back to back con pérdidas. En este caso se puede apreciar que el modelo aporta más reactiva, ya que dicho convertidor inyectaba menos activa y para lograr mejor estabilidad en tensiones el convertidor tiene que inyectar más reactiva, como ocurre en los periodos igual a las 11 h y en el intervalo cercano a 13 h. La diferencia entre este modelo y el de la línea de continua reside en que, en el modelo de la línea de continua existe una pérdida adicional que es la que implica el cableado DC y en el anterior modelo esto no se contempló. Entonces, en el último modelo se tiene que aportar un poco más de activa para vencer estas leves pérdidas y esto afecta directamente a que “no exista tanto espacio” debido a la restricción de potencias, y por esto el modelo back to back más pérdidas inyecta un poco más de reactiva que en el siguiente caso.

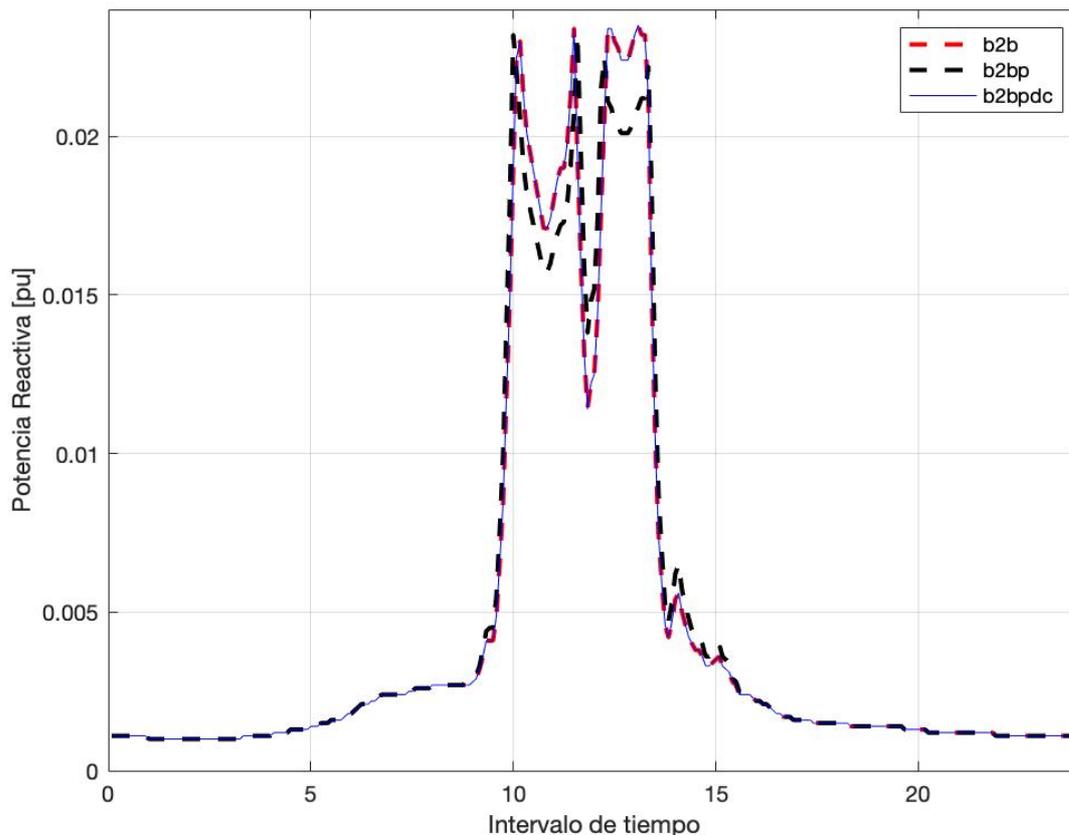


Ilustración 37. Evolucion de la potencia reactiva convertidor cola.

Se avanza el análisis, con la ilustración 37, que representa la reactiva de los convertidores, ahora con el convertidor de cola. Primero, como ya se hizo en el caso anterior se tratará tanto el caso back to back ideal como el caso de modelado de la línea de continua, ya que como se puede apreciar, ambos casos se superponen.

Primero, como se puede observar la inyección de reactiva, a medida que va pasando el tiempo de simulación, va en aumento poco a poco la inyección de reactiva, debido a que también como se puede observar en el perfil de cargas (ilustración 30), también aumenta dicha demanda. Como se puede apreciar, alcanza un máximo en el instante de tiempo de 10 h cuyo valor es de 0.023 p.u. Después de alcanzar dicho máximo, se produce una reducción de la potencia inyectada en el convertidor, comparando su potencia activa en este periodo se produce el máximo de exportación en el convertidor. Dicho esto, el *OPF* para minimizar la potencia del nudo *slack*, tendrá que aumentar la exportación de activa desde cola hacia la cabecera, lo que provoca que disminuya el flujo de la potencia reactiva inyectada por el convertidor. Al igual que cuando se reduce la exportación de la activa en torno al periodo de simulación 12 h, también se produce un descenso de la inyección de reactiva por parte del convertidor, esto es debido a que como se puede observar en el perfil de cargas, se produce una leve disminución de la demanda, además de una leve inyección de activa por parte de la generación PV. Entonces el *OPF* responde a ella de la siguiente manera: si disminuye la demanda levemente, ni se exporta tanta activa, las tensiones no van a disminuir bruscamente, ya que la demanda ha bajado un poco su valor.

Como se puede observar, en el modelo b2b y el modelo b2bpd, son muy similares y dicho análisis realizado al back to back se puede extrapolar al modelo con pérdidas y línea DC.

Se continúa el análisis ahora del modelo back to back más pérdidas, a diferencia de los casos anteriores, cuando se produce el pico de exportación cercano a las 11 h, el convertidor baja aún más la inyección de reactiva debido a que las tensiones de los nudos son más estables y no necesitan tanta inyección de reactiva. Otra diferencia notable que se puede observar, cuando disminuye la inyección de reactiva en el intervalo de tiempo igual a 12 h, este modelo no deja de inyectar tanta reactiva como en los otros dos casos de estudio,

efecto que también se puede ver afectado en la exportación de activa (ilustración 35), haciendo alusión a ambas variables juntas. Como se puede observar, en ese instante se produce una reducción de la demanda y de la inyección de activa, entonces la exportación hacia cabecera disminuye, pero en el caso del back to back con pérdidas no, sigue inyectando activa para subir tensiones y sigue exportando un poco más de activa por la línea de continua. Lo mismo ocurre en horas cercanas a las 15 h, el *OPF* sigue aprovechando esta línea para minimizar pérdidas y sigue inyectando activa y reactiva pese a que a generación PV no este aportando mucho.

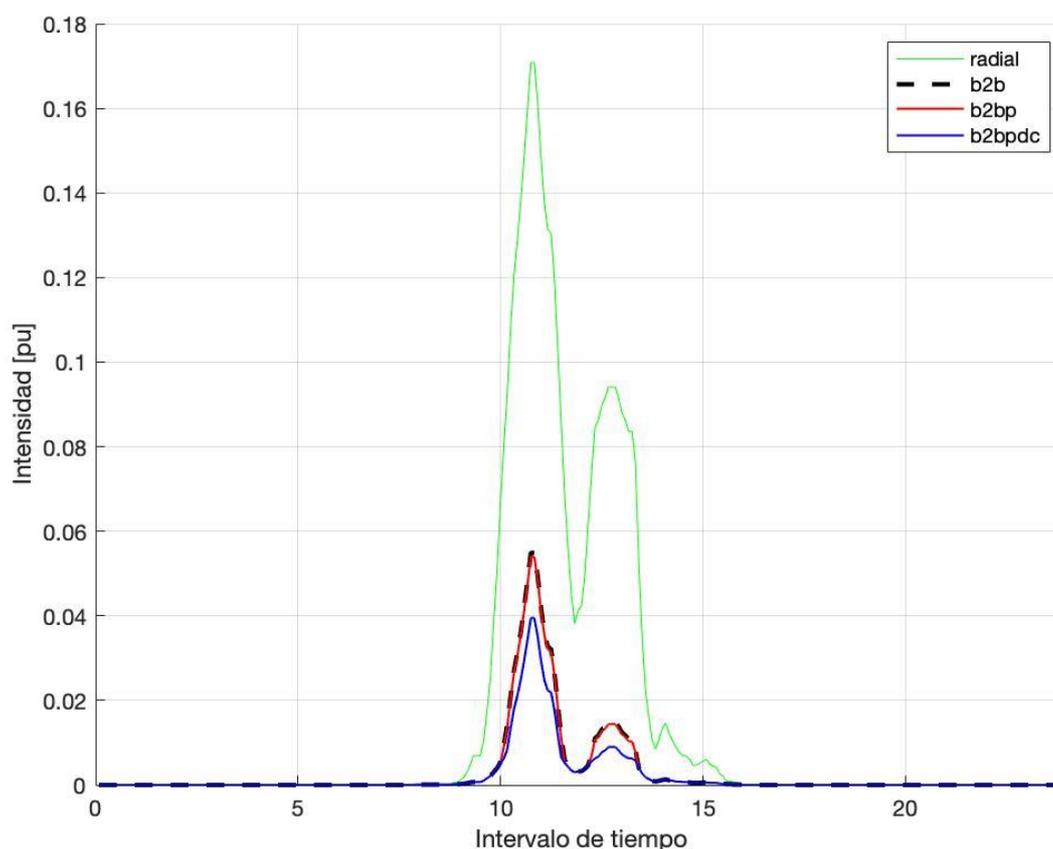


Ilustración 38. Evolución de la intensidad de la rama más sobrecargada.

En la ilustración 38, se trata la última variable de estudio para este modelo de red real, es la intensidad, la intensidad de la rama más sobrecargada. En este caso, se ha calculado la intensidad para el caso radial simple, en este caso de estudio se ha ido viendo rama por rama la evolución y la máxima corresponde con la rama “5”-“4”. Como ya hizo con las tensiones, se va a ir analizando caso a caso, viendo sus mejoras y como impactan dichas mejoras con el modelo de estudio.

Primero, se trata el caso radial, como se puede observar hay picos de intensidad, debido a que se trata de una rama intermedia entre la generación solar y el consumo, como se puede observar en el esquema monofásico (ilustración 24). El máximo se produce cuando la generación fotovoltaica inyecta el máximo de potencia, como ya se vio en otras variables de estudio en torno a las 11 h, y como se puede observar la diferencia entre el pico mayor y el menor es notable, dato que no es muy favorable para la red y que se tratará de mejorar.

Se continúa con el análisis a través del modelo back to back ideal y back to back con pérdidas que como se puede observar, ambas gráficas quedan superpuestas, se consigue reducir considerablemente la sobreintensidad producida por la inyección de activa de los paneles solares en estos tramos horarios, debido a que, si se quiere reducir la potencia que inyecta el nudo *slack*, es directamente proporcional a reducir las pérdidas. Como se puede observar en la ecuación 3.2.4 y la 3.2.7 las pérdidas dependen cuadráticamente de la intensidad, reduciendo el valor de la intensidad se logra reducir dichas pérdidas. Por eso mejora tanto el modelo cuando se implementa esta línea de continua, se consigue redistribuir esta intensidad por ambos

caminos y así reducir la sobreintensidad que se produce en el la rama “5” - “4” a un valor de 0.054 p.u.

Finalmente, para acabar se estudia el ultimo caso, el análisis del modelo back to back con línea de DC. Haciendo referencia a la ilustración 38, cabe destacar que se reduce aun más el valor de la intensidad en la rama más sobrecargada, teniendo en mente el análisis previo, lo que conlleva disminuir la intensidad es reducir aun más las pérdidas. Ahora se obtiene un valor de 0.0395 p.u, dicho esto, es reducir considerablemente la sobreintensidad que se produce en el rama y no solo se realiza este análisis, se va aun mas allá, la diferencia que se produce entre el valor numérico más bajo y el más alto es tambien menor, debido a que se logra disminuir dichos picos de intensidad, que se producen en el intervalo de tiempo igual a 12 h, la intensidad disminuye y con respecto a los casos de estudio previo, la diferencia en este ultimo caso de estudio es mejor, debido a que el *OPF* aprovecha mejor la línea de continua para diversificar los flujos de potencia así reducir la potencia inyectada por el nudo *slack* y lograr mejor estabilidad en tensiones e intensidades y así hacer que la red sea mas fuerte.

4.2.1 Modelo con linea intermedia

En este ultimo modelo, se tratará de explotar más aun el mallado de la línea de continua para así llegar a ver su funcionalidad más a fondo. Este caso de estudio se corresponde con la ilustración 28, se incorporará un nudo intermedio entre los nudos “k5” y “k6” de la línea de continua al que lse llamará nudo “k7”. Se realiza tres casos de estudio, en los que se basa principalmente en inyectar un tanto por ciento de la generación fotovoltaica por este nudo adicional y ver como esto impacta directamente en el modelo. Por eso, a parte de comparar estos tres modelos entre ellos, tambien los se comparará con respecto a los casos de estudio anteriores. Los casos de estudio a tratar son multiplicar la generación fotovoltaica por un tanto por ciento, en este caso los se ha multiplicado por, 80%, 60% y 50% y lo restante irá por el nudo de continua.

A partir de ahí, ejecutar los flujos de cargar y ver como el *OPF* calcula la optimización de la potencia aportada por el nudo *slack* y como aprovecha para minimizar las pérdidas a partir del mallado de la red de continua. Dicho esto, se va a relizar el análisis de las variables de estudio usando el mismo perfil de carga y generación que en los casos anteriores.

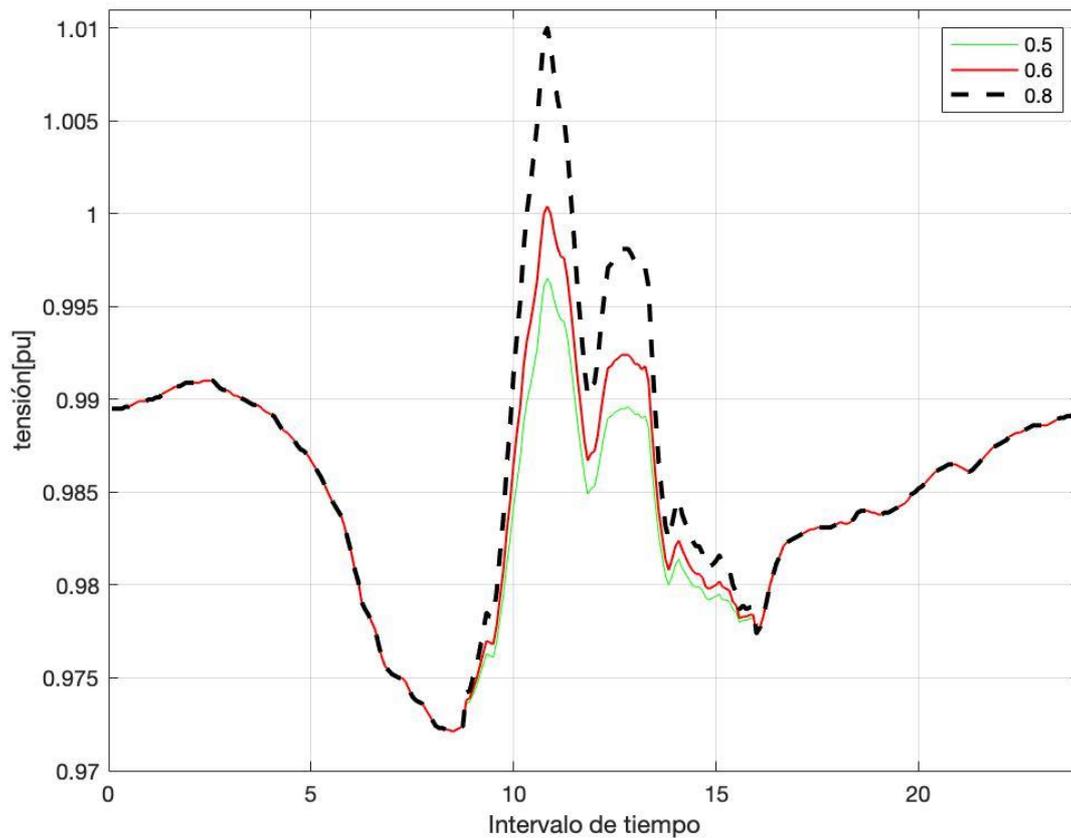


Ilustración 39. Evolución de la tensión del nudo 11 modelo nudo intermedio.

Tras ejecutar los flujos de carga, como se realizó con los casos anteriores, en la ilustración 39 se analiza la evolución durante las 24 h del punto de menor tensión en el caso radial. Hay que tener en cuenta que esta tensión es la del nudo “11”. Primero se trata la evolución para el caso del 80%, es decir, en este caso irá el 80% de la generación PV por la línea de alterna y un 20% por la línea de continua. Como se puede observar, este caso de estudio pertenece a la línea discontinua negra y obtiene un mínimo de 0.972 p.u en torno a las 9 h, debido a que, como se vió en la ilustración de los perfiles de cargas, se produce un aumento de la demanda de potencia y todavía no hay inyección fotovoltaica. En cambio, se produce un máximo de esta tensión en torno a las 11h, cuyo valor es muy próximo a 1.01 p.u., ya que la generación instalada en los nudos auxiliares está inyectando el máximo de potencia activa. Se continúa el análisis estudiando el caso del 60%. Como se puede apreciar, el mínimo se consigue al mismo valor que en anterior caso, pero el máximo reduce su valor considerablemente, llegando su máximo al valor cercano a 1 p.u.

Finalmente, en el último caso de estudio se inyecta la misma potencia por ambos lados, o sea 50% línea alterna y 50% por la línea de continua. En este caso, se puede observar que la tensión baja notablemente hasta valores por debajo de 1 p.u y el mínimo valor de tensión es similar en los dos modelos previos de estudio. Tras el análisis de los tres casos de estudio, se puede observar un detalle muy relevante; en el caso de estudio donde se vierte la misma cantidad de potencia por ambas líneas, es poco eficiente desde el punto de vista a nivel de tensión, ya que se mantienen los nudos por debajo de 1 p.u. en todo momento y no en valores cercanos a la unidad. Con respecto a los otros casos de estudio, se puede observar que ambos casos tienen el mismo valor mínimo, y la tensión del punto máximo en el caso del 60% es menor. Desde este punto de vista, el caso de estudio tiene mejor estabilidad en tensiones.

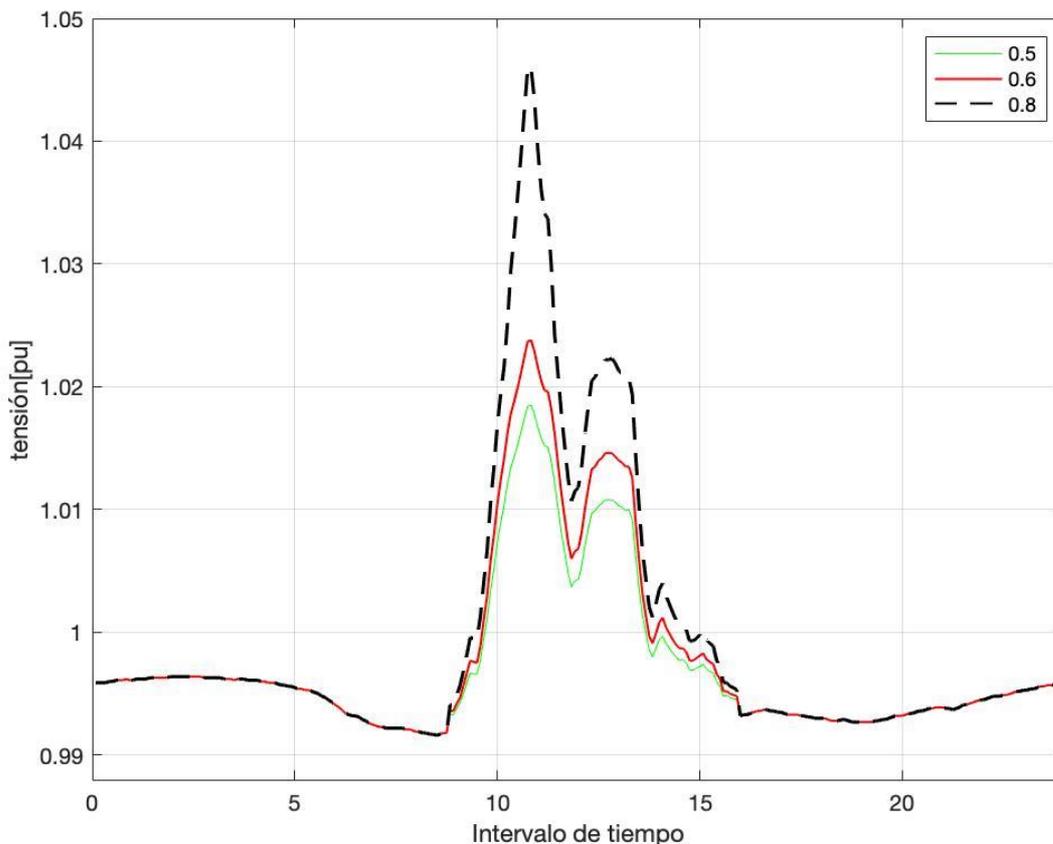


Ilustración 40. Evolución del nudo 8 modelo nudo intermedio.

Siguiendo el análisis de las tensiones, una vez analizado el caso del nudo que sufría menor, ahora en la ilustración 40, se trata el caso del nudo que alcanza el mayor valor de tensión. Dicho nudo es el “8”, tras ejecutar los flujos de carga y *OPF*, se analizarán los resultados obtenidos tras la simulación de un intervalo de tiempo de 24 h entre los tres casos de estudio distintos. Como se puede observar, las tres simulaciones alcanzan su mínimo en torno a las 9 h, con un valor de 0.991 p.u, a medida que aumenta las horas de simulación, se puede ir observando la diferencia entre los modelos. Primero, se trata el caso de estudio de 0.8, se alcanza un valor de 1.046 p.u, siendo un valor muy superior a los siguientes modelos, con respecto al caso de línea de DC, referido a la ilustración 31, se consigue un valor levemente inferior. Análisis que es muy razonable debido a que se le está quitando inyección de activa en ese nudo, lo que implica que dicho nudo este menos saturado y se eleve menos la tensión.

Siguiendo el análisis con el caso de 0.6, en relación al anterior caso de estudio, baja considerablemente la tensión hasta un valor de 1.024 p.u otro dato relevante, como se puede observar en el segundo máximo que se alcanza a las 13h, que pertenecía al instante de tiempo donde cuando la generación PV volvía a inyectar más potencia activa, la diferencia es menor con respecto al máximo global que alcanza la tensión en el caso anterior. Finalmente, el caso de estudio de 0.5, se tiene la misma inyección por ambas líneas, su máximo alcanza a un valor de 1.085 p.u. Valor muy inferior con respecto a los casos anteriores, pero siendo lógico, al dividir la tensión por ambas redes, el nudo no va a estar tan saturado al paso de intensidad por lo que hace que la tensión en este caso de estudio vaya disminuyendo.

Como se puede observar son resultados coherentes los tratados en la ilustración 40. Si se diversifica la generación fotovoltaica, el *OPF* tratará de minimizar la generación del *slack*, en el caso del análisis del nudo 8, este nudo está situado al final de la red enlace entre la red híbrida, además de una generación PV, si se divide la generación PV entre la línea DC y AC, se reducirá la potencia activa inyectada, y a su vez la tensión del nudo.

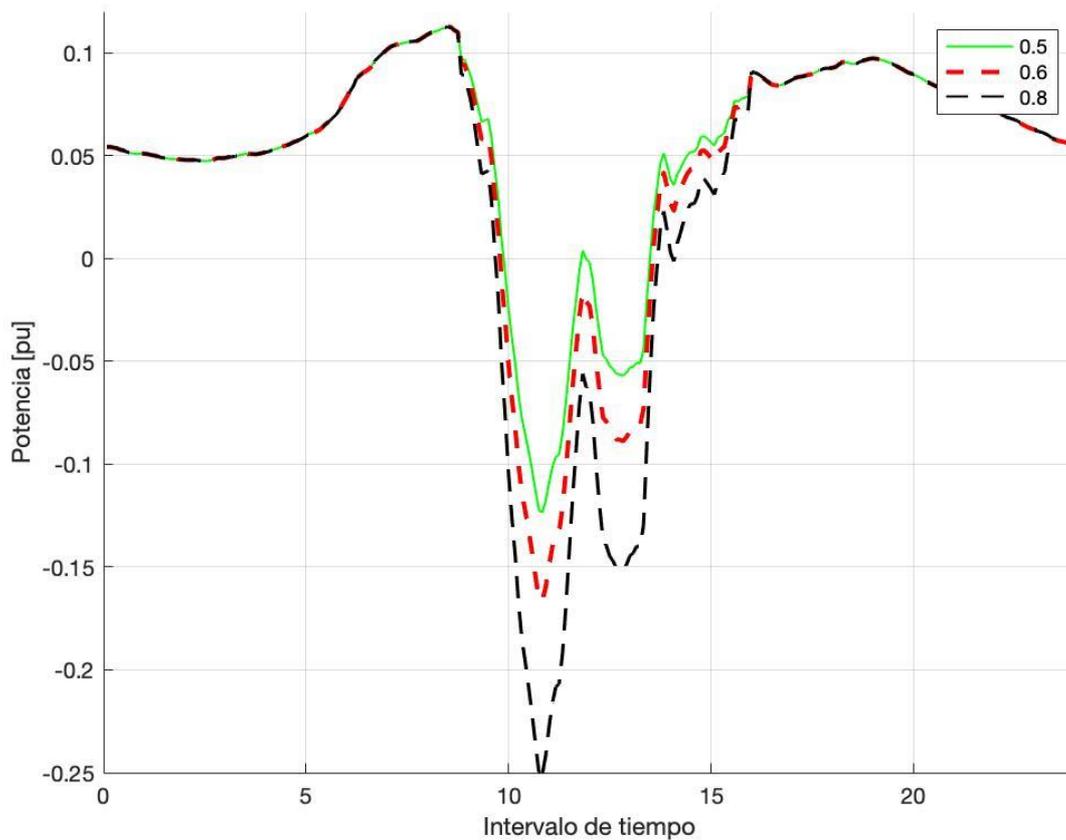


Ilustración 41. Evolución de la potencia aportada por el nudo *slack* modelo nudo intermedio.

Tras el análisis de las tensiones, en la ilustración 42, se analiza la evolución de la potencia aportada por el generador de cabecera, a través de los tres estados de generación adicionales. Primero, se trata el caso de generación 0.8 por la línea de alterna y el 0.2 por la línea de continua. Como se puede observar, en los casos que se han visto anteriormente (ilustración 33), en este caso empieza el generador a inyectar potencia activa a la red hasta un máximo en torno a 0.1p.u aproximadamente, hasta que la generación PV instalada inyecta activa y empieza a exportar activa hasta un máximo en torno a las 11 h, que hay una exportación hacia la red de 0.25 p.u, o sea hay un excedente de energía activa y dicha exportación finaliza en torno a las 15h, debido a que la generación PV ya no satisface la demanda de las cargas y necesita de la potencia del nudo *slack*.

Siguiendo con el análisis, el siguiente caso de estudio, es el caso de 0.6, caso muy similar al anterior, salvo que la diferencia reside que a la hora de exportar activa, el sistema no exporta tanta activa como en el caso anterior, exporta hasta un máximo de 0.15 p.u aproximadamente. Finalmente, en el ultimo caso de estudio, se puede observar, la tendencia que ya se apreció en el anterior caso de estudio, cuando se produce la exportación a red, este caso comparado con los anteriores, es el que menos exporta, y otra particularidad observada, se aprecia en el perfil de generación PV, cuando se produce esa disminución de la activa generada por los paneles PV en torno a las 12 h. Como se tiene diversificada esta generación entre alterna y continua, no satisface lo suficiente para vencer las pérdidas y tiene que inyectar el *slack* un poco de activa, fenómeno que solo ocurre en este modelo.

Para acabar, se realiza un análisis de los modelos estudiado arriba. Con respecto al caso de línea de continua sin nudo intermedio. Como se puede observar en el caso estudiado, sin tener la línea de continua intermedia (ilustración 33), el sistema, puede exportar más a red hasta un máximo de 0.3 p.u, efecto que va poco a poco disminuyendo si se diversifica dicha generación, al estar diversificada entre continua y alterna, las pérdidas de la línea de continua hacen que la exportación no se ha tan notable en comparación al caso sin nudo intermedio. Pero el impacto mas considerable, por ahora lo se aprecia en las tensiones, debido a esta división de la potencia entre continua y alterna, el análisis se hace más notable y donde se pueden sacar mejores conclusiones es desde el punto de vista de estabilidad de tensiones.

Caso de estudio	Potencia nudo <i>slack</i> (p.u)
0.5	15.155
0.6	13.442
0.8	10.056

Tabla 5. Variable objetivo a minimizar red real nudo intermedio.

En la tabla 5, se pueden observar los valores de los sumatorios de la potencia aportada por el nudo *slack* durante las 24 h de simulación mostradas en la ilustración 43. Como se puede apreciar, el valor más alto obtenido es del caso de estudio 0.5 como se pudo observar en la ilustración 43, es el modelo donde menos se exporta a red y como es lógico se ha obtenido el valor más alto de inyección de activa del nudo *slack*. Siguiendo con el modelo 0.6 se ha obtenido un valor levemente inferior ya que en este modelo se exporta más a red. Finalmente, el valor mas bajo se consigue en el modelo 0.8, como se puede observar en la ilustración 43, los tres modelos tienen un comportamiento muy similar, la diferencia reside en la exportación a red que a mayor exportación haría que dicho sumatorio fuese menor. Al diversificar lo potencia a través de las distintas redes, se pueden obtener mejores valores de estabilidad de tensión e intensidad a cambio de un valor levemente superior de la potencia a aportar por el nudo *slack*.

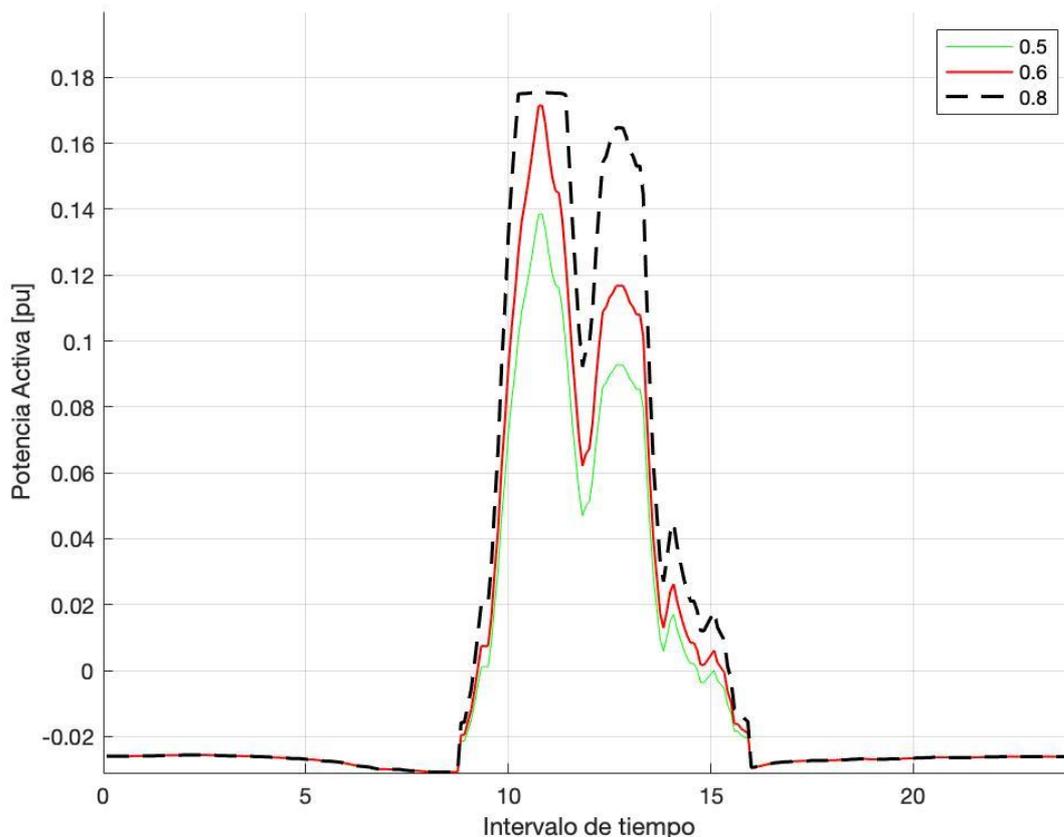


Ilustración 42. Evolución de la potencia del convertidor de cabecera modelo nudo intermedio.

Tras el análisis de las tensiones de los nudos más afectados y de la evolución de la potencia del nudo *slack*, la ilustración 42 trata la siguiente variable de estudio, la potencia manejada por el convertidor de cabecera. Como se puede observar, a medida que se va aumentando el intervalo de tiempo de simulación, el convertidor de cabecera empieza consumiendo potencia activa para llevarla a la cola, hasta que sobre las 9 h empieza a

producir la generación PV y como se puede observar cambia poco a poco el sentido de la potencia. En los periodos cercanos a las 9 h, la potencia consumida del convertidor es 0, hasta que ya pasa a inyectar activa. El comienzo de la simulación de ambos modelos es muy similar, la diferencia se puede apreciar es, que en los instantes de máxima potencia de los paneles solares los modelos de estudios tienen comportamientos diferentes.

Primero, por ejemplo, en el caso de estudio de 0.8 entre los intervalos de tiempo igual a 11 h y 12 h, el convertidor satura a un valor de 0.175 p.u, es decir, no aumenta, esto podría ser que al igual que en los otros modelos de estudios (b2b, b2bp y b2bpdc), el convertidor está trabajando a máxima potencia nominal, para saberlo, se verá posteriormente la potencia aparente.

El siguiente caso es el de 0.6, en este caso, el convertidor no trabaja a máxima potencia nominal, factor que es muy importante, para que el convertidor pueda inyectar tanto activa como reactiva para subir las tensiones y su máximo se alcanza a las 11 h con un valor de 0.171 p.u a diferencia que el anterior caso de estudio, al estar más diversificada la potencia, no maneja tanta potencia activa en las h de alta inyección de la generación PV con respecto al caso anterior.

Finalmente, al igual que el anterior caso de estudio, como se puede observar, el convertidor, no trabaja a plena potencia, hay un margen en las horas de plena inyección de los paneles solares para que el convertidor pueda inyectar activa y reactiva, con un máximo, cercano a 0.14 p.u. Tras finalizar la inyección de potencia activa, el convertidor, como se puede observar en la figura, vuelve a consumir potencia para llevarla a la cola.

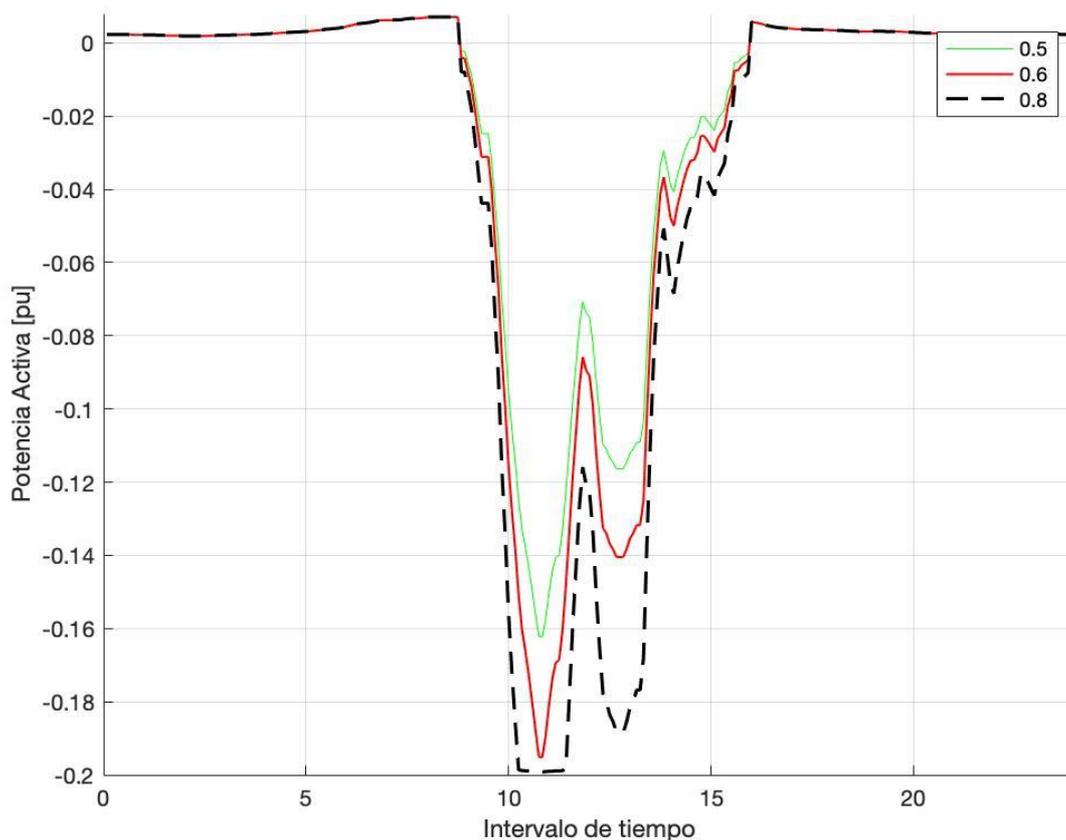


Ilustración 43. Evolución de la potencia activa del convertidor de cola modelo nudo intermedio.

Tras el análisis de la potencia activa del convertidor de cabecera, en la ilustración 43, se analiza la evolución de la potencia absorbida o inyectada por el convertidor situado en el nudo “14”. Como ya se hizo con el anterior convertidor, primero se trata las primeras horas del día. Como se puede ver en la ilustración 43, el convertidor empieza inyectando activa en la potencia proveniente del nudo “13”, hasta que llega a un máximo en torno a las 9 h y a partir de ahí, el convertidor deja de inyectar activa, para absorberla y llevarla a la cabecera para minimizar pérdidas.

Analizando caso por caso, se trata primero el caso de estudio llamado 0.8, como ya ocurría con el convertidor de cabecera, en las horas de mayor inyección de activa por parte de los paneles fotovoltaicos, el convertidor satura, se verá mas adelante que implica esto con respecto a la inyección de reactiva. Solo satura durante este pequeño intervalo de tiempo, durante las demás horas el convertidor no llega a tal máximo de valor 0.199 p.u. Como se puede observar, mayor valor numérico con respecto al anterior convertidor por las pérdidas que presentan las líneas de continua y las asociadas a ambos convertidores. Fenómeno que no ocurre cuando se modela la división de la potencia activa con el factor de 0.6, el convertidor no satura y holgura para inyectar reactiva para subir tensiones, cuyo máximo se obtiene al valor de 0.195 p.u.

El ultimo caso de estudio es el de 0.5, como ya se pudo observar en el caso anterior, el convertidor transporta menos activa en este ultimo caso, hasta un máximo de 0.162 p.u. Al igual que en el caso de estudio anterior, en estos modelos que se ha estudiado, al dividir la potencia de los paneles a través de la línea de continua, los convertidores manejan menos activa debido a que la parte de la activa fluye por este nudo intermedio, entonces el convertidor no tiene que inyectar tanta activa. Para acabar con este análisis, cuando se acaba la generación PV, el convertidor vuelve a inyectar potencia en el nudo de cola.

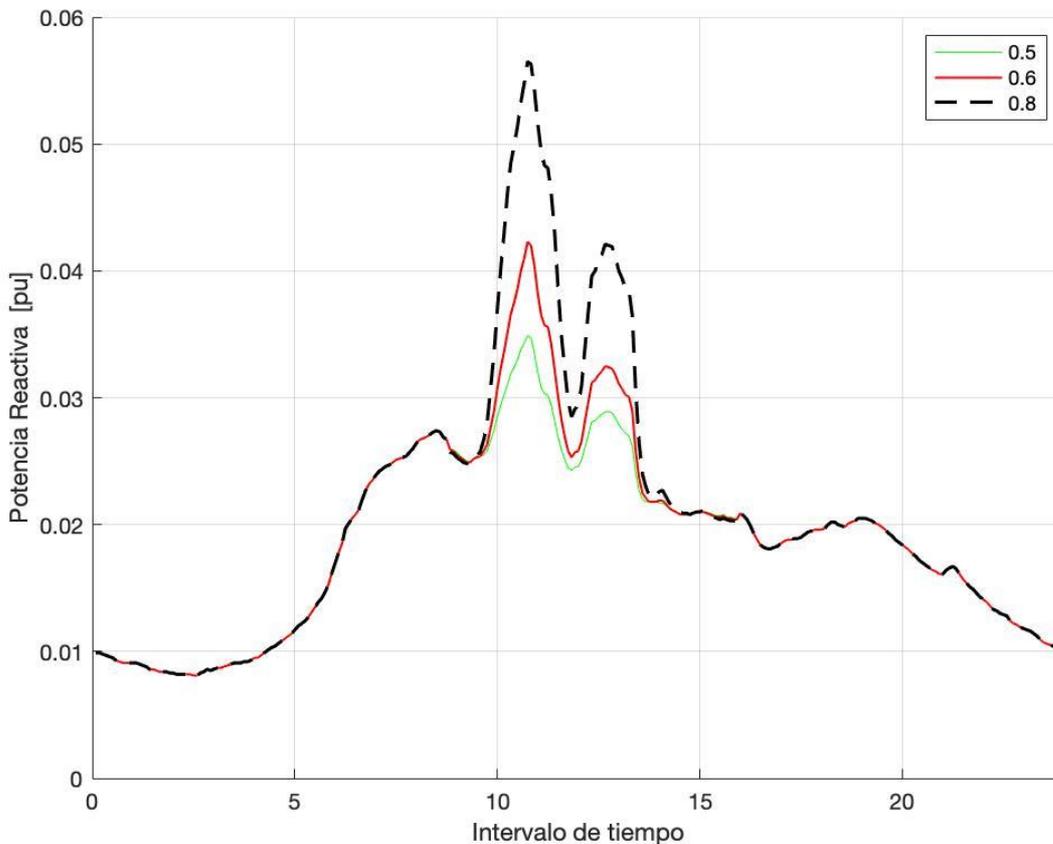


Ilustración 44. Evolución de la potencia reactiva convertidor de cabecera modelo nudo intermedio.

Tras el análisis de la potencia activa, la ilustración 46 representa la reactiva de ambos convertidores, para ver el comportamiento de dichos convertidores como se ajusta acorde a la demanda. Como se puede observar, los tres casos de estudios empiezan inyectando reactiva en torno a 0.01 p.u., a medida que va aumentando las horas de simulación, haciendo referencia a la curva de la demanda de reactiva (ilustración 29), también va aumentando, entonces el convertidor inyecta más reactiva, hasta que llega al punto que corresponde según las 11 h que se produce la mayor demanda. Se Tratará ahora caso por caso, en el caso que se refiere a 0.8, cuando se produce la mayor demanda por consumo, el sistema responde inyectando más activa y reactiva hasta un máximo cuyo máximo satura durante un breve instante de tiempo de 0.0565 p.u. Siendo en los otros casos de estudio, en el caso de estudio de 0.6, el sistema inyecta hasta un máximo de 0.042 p.u. Siguiendo con el análisis, finalmente con el ultimo caso de estudio inyecta menos reactiva hasta un máximo de 0.0347 p.u. Como se puede observar, tras ejecutar los flujos de carga, al redistribuir la generación fotovoltaica por la línea

DC, la tensión de los nudos en los momentos de mayor consumo no se ven seriamente afectadas y esto hace que los convertidores no tengan que inyectar tanta activa y reactiva, no trabajan tanto a potencia nominal. Para concluir, este análisis que se ha realizado se verá reflejado también en la potencia aparente del convertidor.

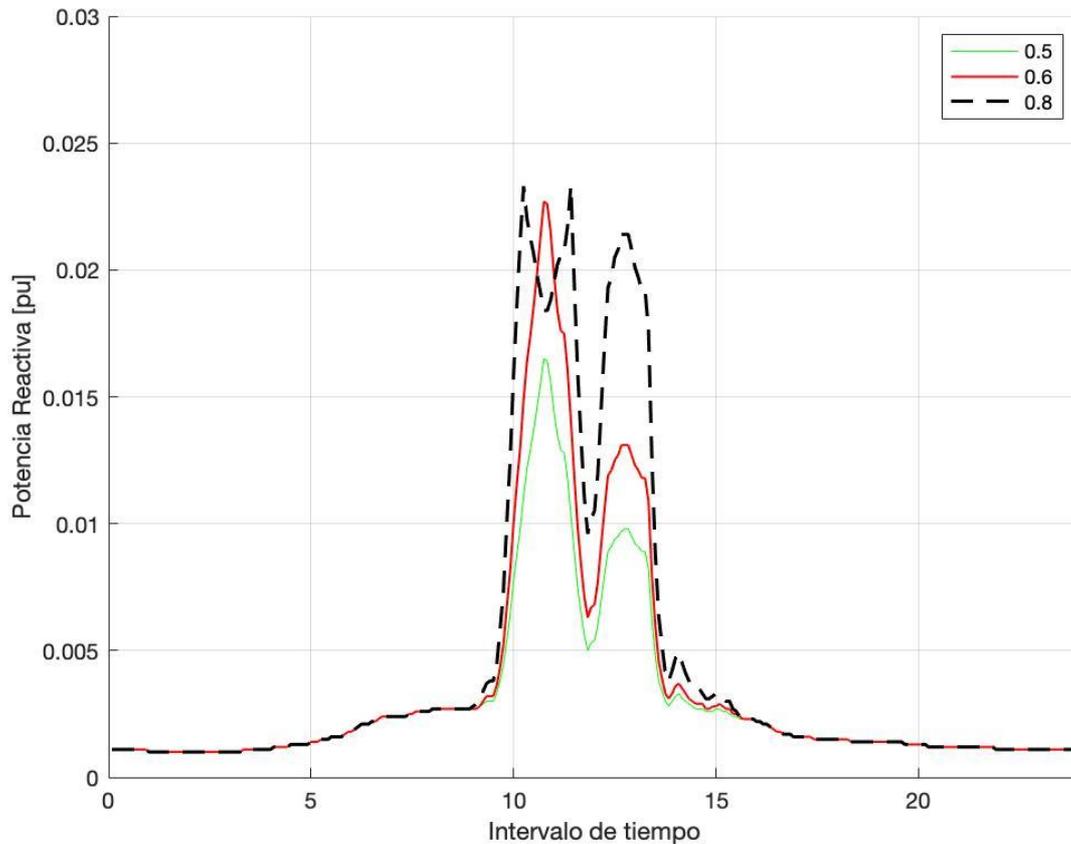


Ilustración 45. Evolución de la potencia reactiva convertidor de cola modelo nudo intermedio.

Siguiendo con el análisis de la reactiva, se finaliza con el análisis de la reactiva del convertidor de cola, en la ilustración 45. Como se puede observar, en los tres casos de estudio, el convertidor inyecta reactiva para subir las tensiones a medida que el consumo va aumentando, para que las tensiones no disminuyan. Como en los anteriores casos, se tratará modelo por modelo.

Primero, se estudia el caso 0.8, a medida que el consumo aumenta entre las 10h y las 12h, se puede observar, que el convertidor inyecta hasta un máximo de 0.023 p.u pero el convertidor reduce brevemente esta inyección de reactiva entre estos periodos, debido a que como se vió en el análisis de la potencia activa, en este pequeño periodo estaba inyectando el máximo de potencia activa, dicho esto, el convertidor está trabajando a potencia nominal.

En el siguiente caso de análisis (0.6), como se puede observar, el convertidor cuando se produce el aumento de la demanda responde inyectando más reactiva, con un valor máximo de 0.023 p.u aproximadamente. Como se puede apreciar, en el periodo donde el convertidor en el caso anterior tuvo que reducir la inyección de reactiva para transportar más activa, como en este caso no está trabajando a potencia nominal responde inyectando más reactiva y así equilibrar mejor las tensiones.

Finalmente, en el último caso, el convertidor no trabaja a tanta potencia nominal, entonces puede inyectar la reactiva que quisiera, cuyo máximo se alcanza en torno a las 11 h con un máximo de 0.017. Dicho convertidor no trabaja tanto a potencia nominal y no hace falta inyectar tanta potencia reactiva para subir las tensiones de los nudos colindantes.

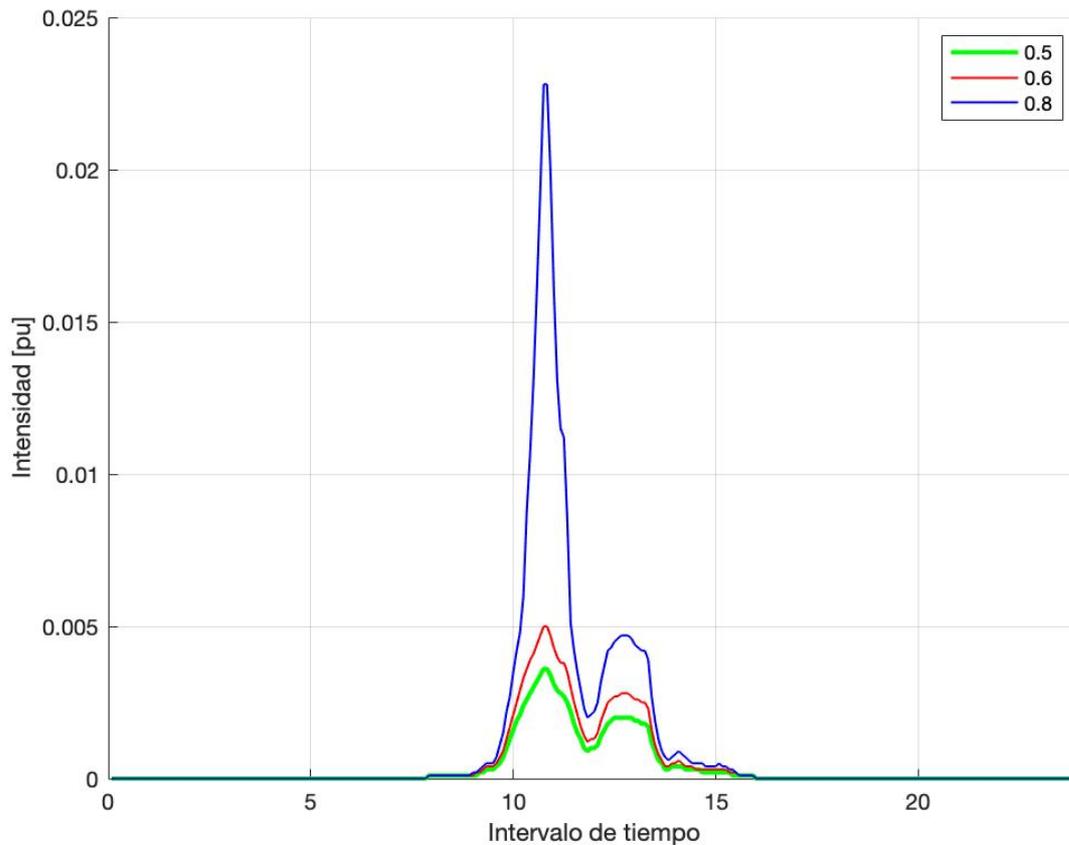


Ilustración 46. Evolución de la Intensidad de la rama más sobrecargada modelo nudo intermedio.

Para terminar, en la ilustración 46, se realiza el análisis se realizará un análisis de la intensidad que circula por la rama “5-4”, que en el caso radial era la mas sobrecargada, pero a medida que se han ido implementando variaciones al modelo para hacer fluir dicha intensidad por caminos alternativos y no sobrecargar tanto esa rama. Como se puede observar, con respecto al caso back to back con modelado de la línea de continua (ilustración 40), se ha conseguido bajar la intensidad considerablemente, ya que en aquel caso se conseguía un pico de sobreintensidad máxima de 0.04 p.u y en este caso, el máximo que se consigue se obtiene en el caso de 0.8 con un valor de 0.023 p.u, bastante inferior al caso comentado previamente. Siguiendo con el análisis, cuando se emplea el siguiente modelo de estudio, el caso de 0.6, se puede observar que el pico mayor de sobreintensidad se obtiene con un valor de 0.005 p.u, haciendo un balance con respecto al caso anterior es casi 5 veces menor que el caso de 0.8 y con respecto al modelado de la línea de continua (b2bpc) es 8 veces menor. Para finalizar, en el caso de 0.5, sería un análisis similar al anterior, se obtienen menores picos de intensidad comparado con los casos previos, comparando el valor máximo de intensidad y el valor mínimo, tanto en el caso de 0.6, como en el caso de 0.5, se obtienen valores muy significantes ya que se consiguen mejores valores de estabilidad frente a sobreintensidad en caso de que aumente mucho la demanda.

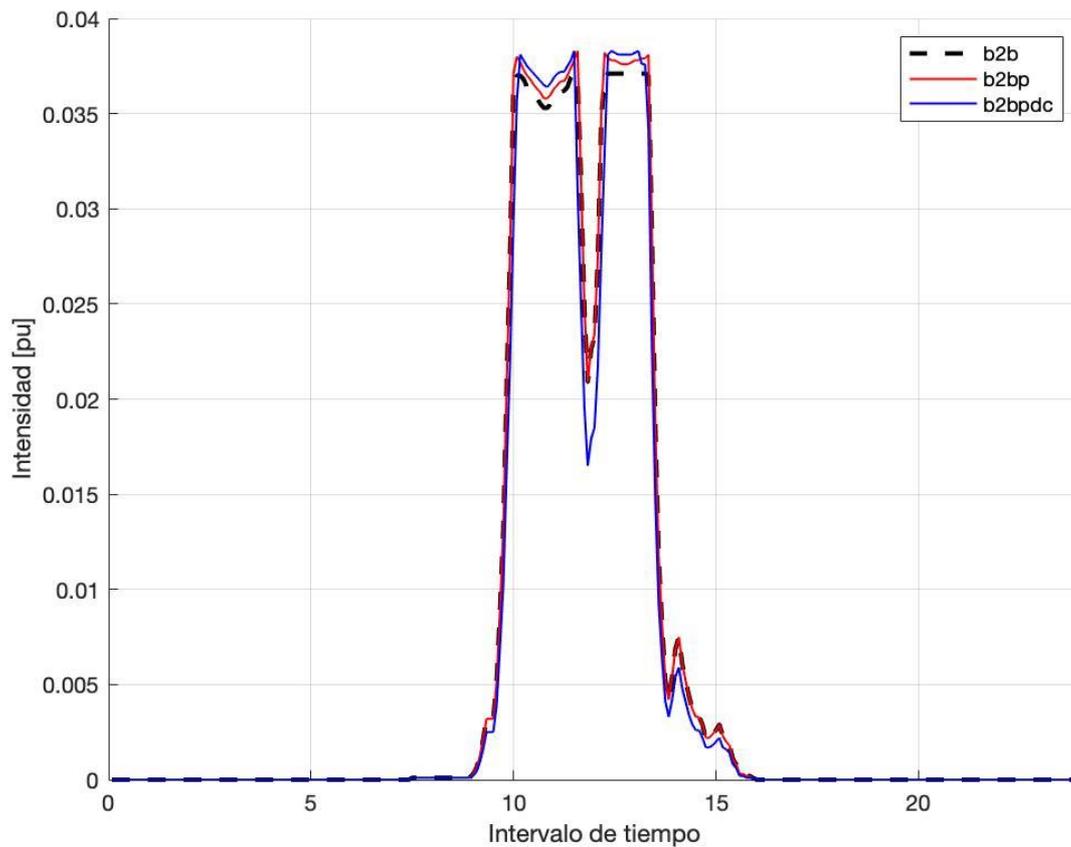


Ilustración 47. Evolución de la tensión rama 7-14 modelo DC.

Finalmente, en esta ilustración 47, se trata de comparar la evolución de la intensidad a través de la rama “7-14”, que es donde está situado el convertidor de cola, y es la rama más cercana a la generación fotovoltaica con respecto a los casos adicionales, que se han diversificado la potencia para ver el impacto que sufre este punto adicional en el sistema. Como se puede observar, en los casos de estudio base, se alcanza un máximo durante el intervalo de tiempo, donde la generación solar, está inyectando la máxima potencia este periodo está referido durante las 10h y las 12h aproximadamente. Los convertidores están trabajando a máxima potencia, como ya se vio en los casos de estudio de los convertidores. Haciendo referencia a los valores que se alcanzan, en los tres casos de estudio alcanzan valores muy similares, es decir, en torno a 0.037 p.u. Esto puede significar, que dicha rama en los tres casos de estudio fluya la misma intensidad para los tres casos, es decir, pese a ser tres casos de estudio que se le vayan incorporando pérdidas, filtros de acoplamiento, modelado de la línea DC, para minimizar pérdidas, en los tres casos de estudio debe fluir la misma intensidad.

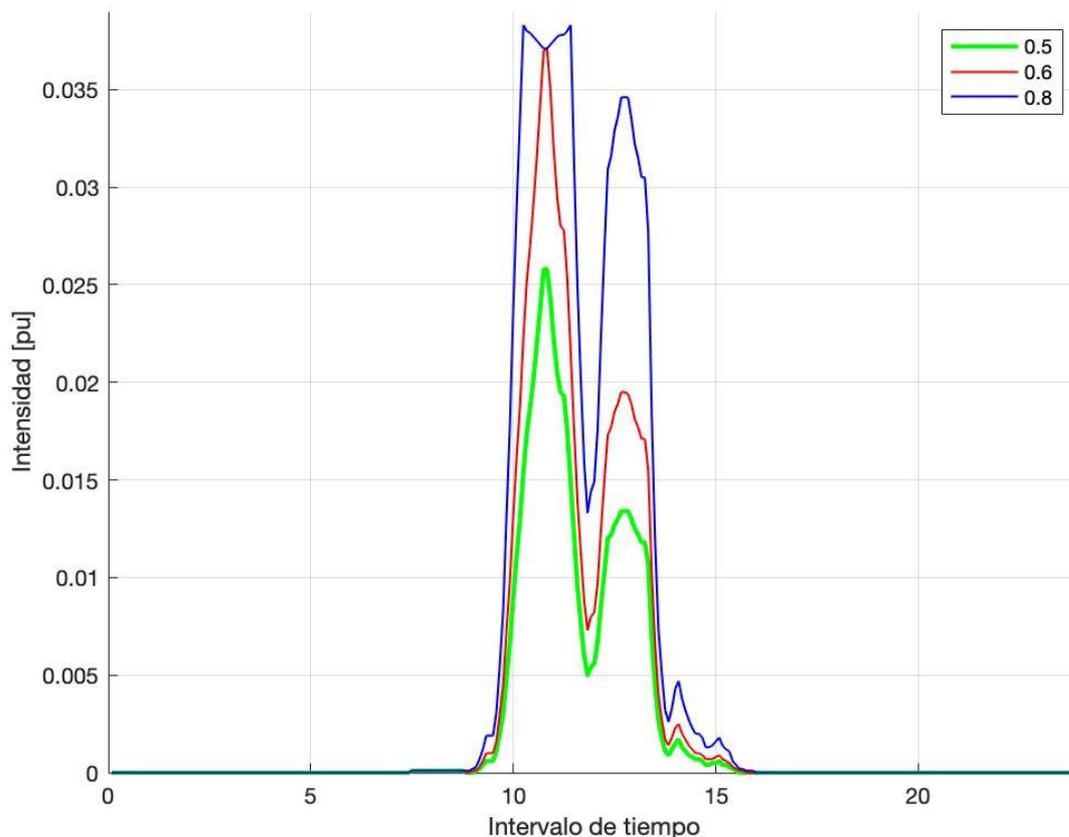


Ilustración 48. Evolución intensidad rama 7-14 DC intermedia modelo nudo intermedio.

En cambio, cuando se analiza la intensidad en los casos de estudio adicionales (ilustración 48). En el caso de estudio de 0.8, apenas se puede apreciar la diferencia, por esa rama circula prácticamente la misma intensidad, su evolución temporal es muy similar a la del back to back con línea de continua, salvo que, cuando disminuye la exportación de los paneles PV, en esta rama disminuye aun más la circulación de la intensidad y esta menos sobrecargada. Pero los casos de estudios mas significativos, son los casos de 0.5 y 0.6. Al estar más dividida la producción entre las dos líneas del sistema, el *OPF* no necesita utilizar tanto la rama de unión entre los convertidores, porque ya la está aprovechando por el nudo intermedio de DC (nudo “7”), para así inyectarlo a la cabecera y minimizar las pérdidas, análisis que es muy interesante ya que así el sistema no está tan sobrecargado para así hacer fluir la intensidad por distintos caminos alternativos y no hacer que la rama de unión entre continua y alterna esté tan sobrecargada.

Finalmente, se acaba con un breve resumen de lo tratado en este punto. Se ha decidido introducir un nudo adicional en la línea de continua, este nudo adicional se ha tratado desde tres casuísticas, se ha multiplicado la generación fotovoltaica por un factor y lo restante se ha inyectado por la línea de continua, con resultados muy interesantes. Por ejemplo, en el caso de 0.5, se ha visto que el punto donde mas se sufría de subtensión, este modelo no lo solucionaba además de que ambos convertidores estaban lejos de sus condiciones nominales, el nudo seguía bajo una tensión inferior a 1 p.u. El modelo de 0.8, lograba bajar un poco la tensión y aumentar esta estabilidad en tensiones, desde el punto de vista de tensiones, es un caso muy interesante de estudio, pero a la hora de analizar otras variables, como es el caso de la potencia manejada por ambos convertidores o la intensidad de la rama más sobrecargada, no se gana mucha ventaja con respecto a los otros casos de estudio.

Finalmente, el caso mas interesante de estudio, es el caso de 0.6, como se ha expresado en los análisis que se han realizado previamente, en el nudo donde sufre de menor tensión, el caso de estudio, logra mejorar esa estabilidad en tensiones, al igual que ocurría en el caso del nudo de sobretensión, logra reducir dicho valor máximo y reducir la diferencia con respecto al valor más bajo. También logra, que los convertidores no trabajen mucho intervalo de tiempo a potencia nominal, al igual que se logra redistribuir la intensidad para no sobrecargar tanto las ramas, además de reducir la diferencia entre los valores máximos y mínimos de

intensidad y ganar también en estabilidad de intensidad. A pesar de que se logre una mayor inyección de la potencia activa por parte del nudo *slack* con respecto a los casos de back to back línea de continua y el caso de estudio 0.8.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la viabilidad de mallar una red de alterna a través de una línea de continua mediante dos convertidores. El estudio se ha basado en escoger primero una red modelo, al que se le han ido incorporando mejoras sucesivas y finalmente se ha aplicado dichas mejoras a una red real. Para ello, se ha realizado un algoritmo de optimización cuyo objetivo es minimizar la potencia del nudo *slack* aportada a través de un perfil de consumo o generación de las cargas de la red.

En primer lugar, se ha considerado que la red modelo que es una red donde en los nudos solamente hay contemplado cargas, y un caso base se ejecuta el flujo de cargas. A continuación, se siguen incorporando las mejoras (incorporación de los convertidores, modelaje de las pérdidas...) y se analizan los resultados. Una vez hecho esto, se realiza la misma filosofía en el caso real; se escoge un caso base al que se le van incorporando mejoras.

La conclusión que se obtienen en ambos casos es muy destacable; al incorporar la línea de continua para minimizar la potencia del nudo generador, el algoritmo vierte esta potencia aprovechando al máximo esta línea alternativa (línea de continua).

De esta manera, como conclusiones destacables a este trabajo se ha obtenido:

- 1.) Mejorar del perfil de tensiones: El nudo que sufre menor tensión, se va consiguiendo poco a poco subirla, y al contrario, al de mayor valor de tensión del mismo nudo consigue reducirla. Además, con respecto al nudo que sufre de sobretensión, también se consigue disminuir este pico que se produce y aplanar dichas tensiones. Estos logros son muy favorables para el análisis, porque se consigue una mejor estabilidad en tensiones. Por lo tanto, cuando existen pequeñas fluctuaciones en tensiones, el sistema es fuerte a estas variaciones y logra responder con la mejor estabilidad a las perturbaciones del sistema.
- 2.) Mejorar del perfil de intensidades: Cuando se trabaja en el caso radial, tener un único camino de flujo de potencia hace que las ramas están mas saturadas. Al incorporar este mallado, el *OPF* tiene otros caminos alternativos para hacer fluir la potencia consiguiendo así que las ramas no estén tan sobrecargadas y estas puedan trabajar en valores más estables.
- 3.) La red es más eficiente: Este tercer punto, está ligado a la función objetivo que se consigue con el algoritmo. Si se quiere minimizar la potencia del nudo generador, es igual a minimizar pérdidas. Con respecto al caso base, en el ultimo caso de estudio, se consigue una red mas eficiente desde el punto de vista energético, ya que como se ha comentado en el punto previo el *OPF* aprovecha dicho camino alternativo, reduce pérdidas y se hace un mejor uso energético de dicha red.

Dicho esto, no solo al incluir una línea de continua se está mejorando y haciendo la red mas flexible como actualmente se conoce, si no que tambien se está usando una tipología de corriente, que es muy usada diariamente. Como resultado, se está acercando la distribución al consumo y facilitando el uso de energía alternativas como puede ser la solar, la eólica, así como tecnologías que se nutren de este tipo de corriente, como podría ser el sistema de baterías. Además, se hace más accesible el uso de estas tecnologías que, a priori se podrían ver limitadas por el uso de la electrónica de potencia, pero a partir de este trabajo de investigación su uso en el día a día podría ser mas extenso y habitual.

REFERENCIAS

- Autor. (2012). Este es el ejemplo de una cita. *Tesis Doctoral*, 2(13).
- Autor, O. (2001). Otra cita distinta. *revista*, pág. 12.
- BOE. (2022). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-8122.
- BOE. (2022).
- Canales sectoriales*. (31 de 01 de 2022). Obtenido de <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/421169-La-instalacion-de-autoconsumo-duplico-la-potencia-instalada-en-2021.html>
- El motor*. (07 de 03 de 2022). Obtenido de El país: <https://motor.elpais.com/conducir/comprar-coche-en-2022-todas-las-ayudas-disponibles/>
- (2022). *Evolución del mercado de la electricidad informe anual 2021*. OMIE.
- Fariza, I. (23 de 01 de 2023). *El País*. Obtenido de <https://elpais.com/economia/2023-01-23/el-autoconsumo-electrico-se-duplico-el-ano-pasado-200000-casas-ya-cuentan-con-placas-solares.html#:~:text=Nuevo%20cap%C3%ADtulo%20en%20el%20imparable,respecto%20a%20un%20a%C3%B1o%20antes>.
- Fernández, A. (14 de 02 de 2023). *Motor*. Obtenido de <https://www.motor.es/noticias/europa-prohibir-venta-coches-gasolina-diesel-2035-202393014.html>
- Híbridos y eléctricos*. (16 de 06 de 2020). Obtenido de *Híbridos y eléctricos*: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/plan-moves-2020-ayudas-5500-euros-comprar-coches-electricos_35949_102.html
- Iglesias, A. (s.f.). *holaluz*. Obtenido de *holaluz*: <https://www.holaluz.com/blog/como-afecta-la-guerra-de-rusia-y-ucrania-al-precio-de-la-luz/>
- Islasolar*. (17 de 04 de 2022). Obtenido de *Islasolarweb*.
- marino, H. P. (Marzo de 2018). *ABB*. Obtenido de *ABB review*: https://library.e.abb.com/public/72a21c607d7d4cd381147fb22f64cc7e/36-43%20m8017_ES_72dpi.pdf?x-sign=1VrSfx+2WXBht/U7DmEzRuL55AHSB/gDxUNWaxPVDOVBUFI9cq0BDbX/kV8qxzoe
- MARINO, H. P. (Marzo de 2018). *ABB*. Obtenido de *ABB REVIEW*: https://library.e.abb.com/public/72a21c607d7d4cd381147fb22f64cc7e/36-43%20m8017_ES_72dpi.pdf?x-sign=1VrSfx+2WXBht/U7DmEzRuL55AHSB/gDxUNWaxPVDOVBUFI9cq0BDbX/kV8qxzoe
- OMIE. (2022). *Evolución del precio de la luz en el año 2021*. OMIE.
- ORtega, J. M. (2017). *Distribución Eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas*. Sevilla.
- Orus, A. (17 de 01 de 2023). *statista*. Obtenido de *statista*: <https://es.statista.com/estadisticas/729638/numero-anual-de-vehiculos-electricos-matriculados-espana/>
- Tarapuez, J. c., & Barrera, G. S. (2010). *GAMS Aplicado a las Ciencias económicas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Tarapuez, J. C., & Barrera, G. S. (s.f.). *Gams*.

