



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Análisis de estabilidad de generadores de energías
renovables basados en controles grid-following

Autor

Daniel Roche García

Director

Miguel García Gracia

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Departamento de Ingeniería Eléctrica / EINA

2024

Resumen

La mayor concienciación social en el efecto que tiene la obtención de energía en el cuidado del planeta ha favorecido el aumento de la integración de energías renovables en el sistema eléctrico. La interacción de estos sistemas con la red es una realidad compleja y variable, que requiere de una normativa de conexión y de un control para mantener la estabilidad de la red.

En este trabajo, se crea un modelo equivalente de un inversor SiC real en Matlab y Simulink, con el fin de estudiar la estabilidad de estos sistemas en su conexión a red. Para el modelado del inversor se transfiere, conforme al estado del arte actual, el funcionamiento real del inversor a un espacio de simulación donde se estudia la estabilidad mediante tres criterios diferentes. Estos criterios de estabilidad proporcionan información gráfica y numérica de los límites de estabilidad y del comportamiento del sistema ante variaciones en el modelo. Este modelo aporta la posibilidad de conocer el comportamiento (en cuanto a estabilidad se refiere) del inversor en su conexión a red, en el paso previo a realizar un cambio en la realidad.

Además, se evalúa la estabilidad para diferentes casos en los que se conoce el funcionamiento en el modelo real conectado a la red de laboratorio (red muy débil) y se estudia el comportamiento del sistema. Además, se compara con la modificación de un valor de red, transformando esta red débil en una red más fuerte eliminando uno de los parámetros de inductancia de la red.

Finalmente, con los resultados obtenidos se comentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación, aportando ideas para la mejora del modelo, mostrando las posibilidades de desarrollo.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo y alcance	3
1.3 Estructura.....	4
Capítulo 2. Conexión a red	5
2.1 Estabilidad en la red	5
2.1.1 Estabilidad de frecuencia.....	5
2.1.2 Estabilidad de tensión	7
2.1.3 Estabilidad de ángulos.....	10
2.2 Principio de funcionamiento de un inversor	10
2.2.1 Inversores monofásicos.....	11
2.2.2 Inversor trifásico de dos niveles	13
2.3 Interacción con la red	14
2.3.1 Grid Following.....	15
2.3.2 Grid forming.....	16
Capítulo 3. Diseño del modelo	19
3.1 Descripción del modelo	20
3.1.1 Aproximación de Padé	21
3.1.2 Planta modelo	23
3.1.3 Impedancia de red.....	24
3.1.4 Filtros EMA.....	25
3.1.5 Control Proporcional Integral	25
3.2 Descripción del comportamiento del control	25
Capítulo 4. Resultados	26
4.1 Criterios de Estabilidad.....	26
4.1.1 Lugar de las raíces (Rlocus)	26
4.1.2 Nyquist.....	27
4.2 Resultados Matlab	28
4.2.1 Filtro con condensador de 2 μ F.....	30
4.2.2 Filtro con condensador de 20 μ F.....	36

4.3 Comparación resultados Simulink.....	40
4.4 Influencia de la red en la estabilidad	43
4.4.1 Filtro con condensador de 2 μ F.....	44
4.4.2 Filtro con condensador de 20 μ F.....	48
4.5 Comparación de resultados	50
<i>Capítulo 5. Conclusiones</i>	<i>54</i>
<i>Capítulo 6. Líneas futuras.....</i>	<i>56</i>
<i>Bibliografía.....</i>	<i>57</i>
<i>Anexo A</i>	<i>60</i>
<i>Anexo B.</i>	<i>62</i>
<i>Anexo C.</i>	<i>64</i>

Capítulo 1. Introducción

Este trabajo fin de máster se realiza en el ámbito del departamento de Ingeniería eléctrica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza. El propósito de este es analizar desde el punto de vista de la estabilidad, el modelo real de un inversor creado por el grupo de investigación y de su conexión a la red. Para ello, se crea un modelo de la planta real, que permitirá conocer el comportamiento previo ante cualquier cambio realizado en la realidad.

Para analizar la estabilidad del modelo real, se utiliza un sistema continuo que modela la conexión a red de un inversor para el que previamente se ha desarrollado un filtro LCL que permite cumplir con la normativa vigente de conexión a red. Mediante Matlab y sus herramientas se obtiene la estabilidad del modelo propuesto y se compara con los resultados experimentales de trabajos previos.

1.1 Antecedentes

La situación climática a la que nos enfrentamos ha supuesto un cambio en nuestros comportamientos. Entre ellos está, la forma en la que utilizamos los recursos naturales que tenemos a nuestra disposición para obtener energía. Desde el acuerdo de París llevado a cabo en 2015

[1], la mayor parte de los países implementaron una serie de medidas con el fin de reducir el calentamiento global y mantener el incremento de la temperatura del planeta por debajo de 1,5 C. Las energías renovables juegan un papel fundamental en estos objetivos gracias a la utilización de recursos ilimitados y no contaminantes, de ahí que la UE pretenda que un 42% de la energía producida en Europa sea de origen renovable.

Durante los últimos años, España ha aumentado su potencia instalada renovable hasta alcanzar los 125.620 MW [2], colocándose así en el segundo lugar de todos aquellos países que se encuentran dentro de la ENTSO-E [3], normativa que regula a nivel

europeo la conexión a la red de los generadores. La energía solar fotovoltaica es la que más ha crecido este año mientras que la eólica se mantiene como energía renovable con mayor presencia en el sistema eléctrico español. Además, la producción de energía renovable ha alcanzado el 50,3% llegando así a un récord histórico, facilitado en gran medida gracias las condiciones meteorológicas favorables para la obtención de recursos naturales de las que disponemos en España.

A su vez, al igual que ha cambiado durante los últimos años la forma en la que se obtiene la energía, el sistema eléctrico se ha tenido que adaptar a las nuevas condiciones de generación. Mantener el equilibrio en tensión y frecuencia de la red es uno de los principales objetivos del sistema, de forma que, ante una perturbación o un cambio inesperado, la reacción sea lo suficientemente rápida para que el sistema eléctrico se vea lo menos afectado posible. Con anterioridad a la aparición de energías renovables [4], la generación provenía de sistemas de rápida regulación de potencia, ya que el recurso se podía almacenar, es el caso de ciclos combinados, nucleares, hidroeléctricas, etc. Además, estas fuentes de generación se caracterizan por utilizar generadores síncronos que permiten al operador del sistema recuperar la calidad de suministro ante una falta rápidamente puesto que pueden generar y absorber energía reactiva.

Por otro lado, a pesar de sus ventajas y su neutralidad en cuanto a emisiones contaminantes, las energías renovables como la fotovoltaica y las eólica presentan una serie de problemáticas en cuanto a su operatividad. Entre ellas, la variabilidad del recurso (eólico y solar), hace que en determinados periodos la generación varíe afectando así a la frecuencia y la tensión en la red. Además, aunque el operador del sistema sea capaz de predecir el comportamiento de la curva de consumo para un día determinado, en ocasiones ocurren variaciones en las cargas o perturbaciones de la red que las fuentes renovables no pueden contrarrestar debido a su dependencia del recurso natural. Una solución sería el almacenamiento en periodos en los que la carga es inferior y la producción superior, pero los altos costes y la complicada tecnología necesaria (hidrogeneras, BEES, etc.) hacen que no sea una solución viable hoy en día.

Las fuentes de energía renovables, como la eólica y la fotovoltaica, utilizan inversores con etapas de potencia que transforman la tensión y corriente continua (DC) en alterna

(AC) que debido a las ondas de modulación utilizadas pueden introducir armónicos en la red si el filtrado que se realiza no es adecuado, y se obtiene una onda distorsionada. En estos casos, se diseñan filtros como el que se comenta en este trabajo para inyectar a la red una onda acorde a la normativa vigente y que desestabilice lo menor posible las condiciones de funcionamiento de la red. A diferencia de los generadores síncronos, estos inversores utilizados en energías renovables no cuentan con la inercia natural, por lo que un descenso de esta influye en el tiempo de recuperación de la frecuencia ante un desequilibrio de cargas.

Ante esta situación, donde el papel de las energías renovables es cada vez más importante, es imprescindible investigar y avanzar en estos modelos de generación, así como en su integración a la red. Por eso, en este trabajo se continua con el modelado de un inversor real, analizando su estabilidad y su comportamiento ante el conexionado a una red local, facilitando así futuros estudios.

1.2 Objetivo y alcance

En este trabajo final de máster, se pretende llevar a cabo un estudio de estabilidad para un modelo continuo creado mediante Matlab y Simulink de un inversor basado en tecnología SIC conectado a la red de laboratorio al que se le aplica un filtro pasivo LCL [5], con el fin de limitar los niveles de armónicos vertidos a la red.

Para crear el modelo continuo, se utiliza literatura y se adapta a las necesidades concretas del sistema real actualmente en funcionamiento. Además, se seleccionan diferentes métodos de estudio de la estabilidad del sistema en su conjunto (inversor, filtro, controlador, etc.) en función de las propiedades del filtro LCL. Gracias a que el modelo está en funcionamiento, se pueden comparar los resultados con la realidad, tratando de alcanzar un comportamiento similar y construir un modelo fiable.

Una vez creado un modelo fiable y acorde con la realidad, Matlab y Simulink representan unas herramientas muy potentes para extrapolar el modelo a situaciones más complejas, conociendo previamente el comportamiento de la planta antes de realizar cualquier cambio en la realidad.

1.3 Estructura

En este apartado se expone el orden que se va a seguir en primer lugar desde el punto de vista teórico y posteriormente del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

En el capítulo 1 se ha mostrado la importancia de la investigación en la integración de energías renovables y su impacto en Europa y España. Además, se ha comentado su importancia en la estabilidad de la red y los retos que se esperan dadas las nuevas directrices de la Unión Europea.

En el capítulo 2, se lleva a cabo una revisión teórica en primer lugar de la estabilidad del sistema (frecuencia, tensión, etc.) así como del impacto tanto positivo como negativo de la integración de las energías renovables. También, se revisan distintos tipos de convertidores utilizados y de su paso de continua a alterna. Finalmente, se describen los principales controles (grid-following y grid-forming) utilizados en inversores, en este caso de inversores fotovoltaicos.

El capítulo 3 describe el modelo continuo de control que simula el comportamiento del inversor real de trabajos previos. Se describen sus principales componentes y su funcionamiento, así como las simplificaciones realizadas con respecto a la bibliografía.

En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos mediante simulación con Matlab y Simulink, para diferentes valores de los componentes del filtro de armónicos. Además, se varían los parámetros de la red para obtener su influencia en la estabilidad. Esto permite ajustar el modelo simulado para futuras líneas de investigación.

En el capítulo 5 se sacan las conclusiones tras analizar los resultados y se exponen las líneas futuras de investigación de este trabajo.

Capítulo 2. Conexión a red

En este capítulo se pretende poner en contexto el trabajo llevado a cabo, describiendo aspectos fundamentales de la estabilidad de la red, así como de la conexión a esta de energías renovables mediante inversores. Esto, muestra la importancia del trabajo realizado y la previsión de la introducción al sistema eléctrico de un modelo de generación en auge y que puede afectar a su comportamiento.

2.1 Estabilidad en la red

La coyuntura climática que se vive durante los últimos años, así como la mayor concienciación en el cuidado del planeta ha derivado, entre otras cosas, en la utilización del recurso renovable para la generación de electricidad. Esto también supone cambios en el sistema eléctrico que se ha tenido que adaptar ante esta nueva situación, además de los organismos que regulan y controlan el suministro para todas las personas.

Se conoce como estabilidad, a la capacidad que tiene un sistema eléctrico para recuperar su estado normal de operación ante un desequilibrio físico, de forma que se vea lo menos afectado posible, manteniendo el resto de las variables intactas [6]. El estudio de la estabilidad de un sistema de potencia se clasifica en: estabilidad de frecuencia, de tensión y de ángulos.

2.1.1 Estabilidad de frecuencia

Uno de los principales factores que influyen en la calidad de la energía es la frecuencia de la red que puede verse afectada por desequilibrios entre carga y generación. En la generación síncrona, la frecuencia está relacionada con la velocidad de giro, de forma que, al ser la frecuencia de entorno a 50 Hz, todos estos generadores giran a la misma velocidad angular.

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (1)$$

Donde n es la velocidad de giro en revoluciones por minuto y p el número de pares de polos.

Ante un descenso de generación o aumento de la carga, la frecuencia de la red disminuye debido a que la potencia mecánica proporcionada por los generadores se mantiene constante y el exceso de demanda se trata de cubrir con el exceso de energía cinética de estas según su inercia. De esta forma, la velocidad de giro de las turbinas se reduce y con ello la frecuencia de sistema [7]. La velocidad de caída dependerá de la inercia del conjunto de generación y de la reserva de energía rodante, que en función del tiempo de acceso será primaria, secundaria y terciaria. La reserva primaria hace referencia a los generadores sincronizados con la red y en funcionamiento durante el descenso de la frecuencia y ante necesidad, pueden aumentar su capacidad de generación para dar soporte al sistema. Mientras que la primaria mantiene la frecuencia durante los primeros instantes de la pérdida, la secundaria la reconduce a su valor nominal mediante los cambios de consigna recibidos del centro de control. Finalmente, la respuesta más lenta la lleva a cabo la terciaria mediante la incorporación de grandes centrales (centrales hidráulicas, turbinas de gas, etc) que tardan tiempo en conectarse a la red y que en ese momento están paradas.

Ante una pérdida de generación o aumento de cargas, la velocidad de descenso de la frecuencia depende en gran medida de la inercia del sistema, aunque también se puede paliar con lo que se conoce como deslastre de cargas, que permite una rápida respuesta al descenso brusco de la frecuencia. A su vez, la inercia la aportan grandes masas giratorias que actúan en generadores síncronos en grandes centrales e influye de forma directa en la velocidad de caída de la frecuencia ante una pérdida de generación según:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = -\frac{\omega \cdot \Delta p}{2H} \quad (2)$$

Siendo H la constante de inercia (s), $-\Delta P$ la pérdida de potencia de generación del sistema y ω la velocidad angular de giro. Como se ha comentado, la inercia que aportan

las grandes masas giratorias es imprescindible para mantener una calidad de suministro equilibrada y tener una rápida respuesta ante perturbaciones inesperadas.

2.1.2 Estabilidad de tensión

La regulación de tensión en los nudos de la red es una de las funciones principales del operador del sistema, garantizado así la calidad de suministro para todos los agentes y operadores de la red. Las variaciones en tensión se pueden dar a causa de perturbaciones, por la desconexión de cargas o líneas de forma repentina, así como por el exceso de generación renovable, que debido a la variabilidad puede producir desajustes en la tensión suministrada. Es importante saber que el control de la tensión está relacionado con la energía reactiva en circulación en la red, de forma en cada nivel de tensión tienen que existir unas compensaciones adecuadas de reactiva. Es por eso por lo que tanto el operador del sistema, encargado de niveles de tensión superiores (400 y 220 kV) así como distribuidoras ($\leq 132\text{kV}$) controlen el consumo y generación de reactiva en la red. Los actores principales que intervienen en el mantenimiento de la tensión en la red son [8]:

Generadores

Dependiendo de las características de generación, realizan una función diferente en el control de la tensión. Por un lado, los generadores síncronos pueden inyectar y consumir potencia reactiva de la red modificando su factor de potencia a diferencia de los asíncronos que únicamente la consumen. Por eso para la regulación de tensión solo se utilizan los generadores síncronos. Por otro lado, los generadores fotovoltaicos y eólicos pueden controlar por medio de los inversores, el factor de potencia y con ello la energía reactiva inyectada o consumida.

Condensadores y reactancias

Son elementos que se conectan a la red y que permiten un control pasivo de la tensión, además la potencia inyectada o consumida depende de la tensión y la intensidad, así como de los valores de inductancia y capacitancias utilizados.

$$Q_g = \frac{U^2}{X_c} \quad (3)$$

$$Q_c = X_l \cdot U^2 \quad (4)$$

Por su parte, los condensadores se utilizan mayormente en las redes de mayor tensión para producir un aumento de esta y en las de menos tensión para mantener el factor de potencia estable en torno a la unidad. Las distribuidoras y el operador del sistema (Red Eléctrica), realizan un control exhaustivo de la energía reactiva que se vierte o consume de la red existiendo penalizaciones elevadas para aquellos que incumplan los límites establecidos. Para los generadores el reglamento que regula la calidad de suministro es el Reglamento 2016/631 [9], de forma que en muchas ocasiones tienen que compensar mediante la introducción de condensadores la energía vertida a la red.

Líneas Eléctricas

El transporte de energía desde las fuentes de generación hasta el consumidor final desempeña un papel importante en la calidad del suministro. De esta forma, en las redes de transporte, por ejemplo, se siguen los criterios establecidos en el PO 13.3 [10] del SEP para el diseño de líneas, potencias de cortocircuito, conexión a subestaciones, etc. Además, las líneas eléctricas, permiten controlar la tensión cuando es necesario una reducción de esta, sobre todo en las redes de transporte y de reparto.

El control de reactiva viene determinado por la tipología del cableado utilizado ya que por ejemplo, las redes subterráneas generan una mayor cantidad de reactiva debido a que los cables utilizados junto con el aislamiento necesario actúan como un condensador. También es importante la tensión en la que se actúa ya que a mayor tensión la potencia reactiva generada es mayor que en tensiones inferiores. Por otro lado, el consumo de energía reactiva depende de la carga que tenga la línea en cuestión, a mayor carga, mayor será la energía consumida por la red.

Transformadores

Los transformadores de potencia consumen energía reactiva proporcionalmente al cuadrado de la intensidad según:

$$Q_c = X_{cc} \cdot I^2 \quad (5)$$

Donde X_{cc} se corresponde con la reactancia de cortocircuito del transformador. Son capaces de intervenir en el control de la tensión debido a la posibilidad de modificar la relación de transformación. Esto se consigue en función de las espiras que rodean al núcleo primario y las tomas que se establezcan a lo largo de este bobinado. En función de la regulación de esta relación de transformación podemos encontrar dos tipos:

- Con regulación en carga: pueden modificar su relación de transformación sin desconectarse de la red.
- Regulación sin carga: es necesario desconectarlos de la red para cambiar la relación de transformación.

La regulación sobre los transformadores es diferente en función de la tensión a la que se encuentran conectados. Para las redes de transporte y reparto (400 kV, 220 kV), los transformadores se pueden regular para que aporten o consuman energía reactiva a la red, de forma que controlan la tensión directamente. Además, también se pueden incluir condensadores y reactancias en estas tensiones como se ha comentado en este mismo apartado. En cuanto a la red de reparto (132 kV) es preferible conectar y desconectar bancos de condensadores antes de modificar las tomas de regulación de los propios transformadores para evitar el flujo de energía reactiva a niveles superiores de tensión [8]. A su vez, en las tensiones antes comentadas, es importante que la regulación del transformador se realice de forma manual para evitar el desequilibrio de los flujos de energía reactiva entre tensiones.

En cuanto a las redes de menor tensión donde se sitúan las de reparto (66 kV y 45 kV) y las de distribución (20 kV, 15 kV y 400 V) la compensación se realiza en mayor medida con la introducción de condensadores que se encargan de controlar el factor de

potencia, aunque en las de reparto la regulación en carga automática de los transformadores interviene en la regulación.

2.1.3 Estabilidad de ángulos

Como ya se ha comentado, la estabilidad del sistema también reside en el mantenimiento del giro de los rotores de todos los generadores síncronos a la misma velocidad. Ante un cambio de frecuencia, debido a perturbaciones o desequilibrio de cargas, la velocidad de giro de los rotores varía. En condiciones ideales:

$$T_m = T_e \quad (6)$$

Esto quiere decir, que la potencia mecánica de entrada del generador y la potencia eléctrica [6] de salida a la red deben mantenerse en equilibrio si el giro permanece constante. Ante un cambio en la velocidad de giro, el generador que lo hace a menor velocidad transmite parte de la carga al que mayor velocidad tiene, de forma que el equilibrio se mantiene. El problema aparece, cuando la diferencia de ángulos es tan elevada que el sistema no es capaz de absorber su energía cinética.

La estabilidad de ángulos es un aspecto fundamental en la estabilidad de la red, ya que evita la desconexión de generadores síncronos y con ello la variación de frecuencia y tensión de la red.

Como se ha visto en este apartado, la estabilidad en frecuencia, tensión y ángulos están relacionadas y dependen de la capacidad del sistema para responder ante desequilibrios en la red. Por eso, la inversión por parte del Operador del sistema y las distribuidoras en la red eléctrica ante el aumento de generación renovable. De esta forma, se mantiene la calidad de suministro y se consigue un menor desequilibrio ante perturbaciones en la red.

2.2 Principio de funcionamiento de un inversor

Este trabajo se realiza sobre una planta real, que más adelante se describe, pero se considera importante previamente la descripción general del funcionamiento de un

inversor, así como de las diferentes tipologías que existen. Un inversor eléctrico tiene la función principal de transformar la corriente continua en corriente alterna, mediante un sistema físico conectado de forma lógica para generar una onda de tensión y corriente con las condiciones necesarias para inyectar energía a la red. Algunas de sus principales aplicaciones se dan en los automóviles eléctricos, unidades de motor y en especial en las fuentes de generación renovables, como en la fotovoltaica y la eólica. Una primera clasificación vendría del tipo de conexión, monofásico o trifásico.

2.2.1 Inversores monofásicos

Inversor monofásico en medio puente (Half Bridge)

Se trata del inversor más sencillo que consta de un divisor capacitivo que permite dividir la tensión de entrada a la mitad en el punto común. Además, se utilizan dos transistores y dos diodos en paralelo que mediante la activación y desconexión de los transistores permiten obtener una onda cuadrada de la tensión de salida que oscila entre $V_{DC} / 2$ y $-V_{DC} / 2$. Al obtener una onda de tensión cuadrada a la salida, el contenido de armónicos es muy elevado y filtrarlos es un proceso complejo. Además, la frecuencia de conmutación depende de los interruptores [11]:

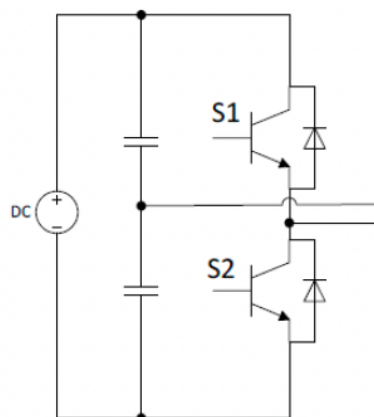


Fig. 1 Inversor en medio puente

Inversor monofásico en puente completo (Full Bridge)

A diferencia del caso anterior, esta tipología cuenta con cuatro interruptores divididos en dos ramas, S1 y S2 y por otro lado, S3 y S4. Al aumentar el número de interruptores aumentan las combinaciones posibles y en este caso la tensión de salida podrá tomar tres valores diferentes: V_{DC} , $-V_{DC}$ y 0 [11]. Las dos estrategias que se utilizan en puente completo son:

- Sin deslizamiento de fase: se mantienen activos de forma simultánea los interruptores localizados en la diagonal. Por ejemplo, durante el mismo periodo de tiempo se mantienen activos S1 y S2, y posteriormente se activan S3 y S4, de esta forma se obtiene una onda cuadrada que a diferencia del medio puente tiene el doble de amplitud.
- Con deslizamiento de fase: mediante la variación de los tiempos de activación de los interruptores se puede obtener una onda más próxima a la senoide haciendo que este pase por 0. Mediante el uso de un coeficiente de desfase que modifica la amplitud de salida.

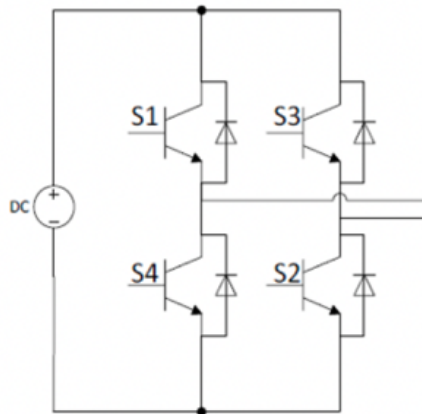


Fig. 2 Inversor en puente completo [12]

Inversor Push-Pull

Este inversor basa su funcionamiento en la utilización de un transformador con un punto medio en el que se introduce la referencia de tensión. Cuenta, como el inversor en medio puente con dos interruptores que conmutan su funcionamiento para dejar en cada momento cada uno de los devanados primarios cargados de forma que se induce

en el secundario una onda cuadrada. Al igual que ocurriría con el medio puente, la onda cuadrada introduce a la red un alto contenido en armónicos.

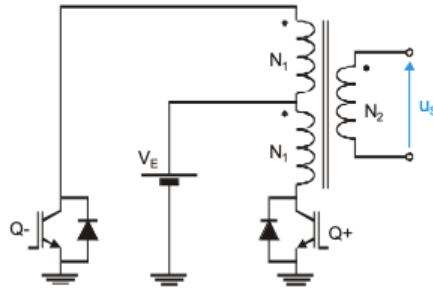


Fig. 3 Inversor Push-Pull [11]

2.2.2 Inversor trifásico de dos niveles

Este inversor es el más comúnmente conocido y el que se utiliza en las aplicaciones de energías renovables de las que se ha hablado en este trabajo. Al igual que en los casos anteriores, los interruptores disponen del estado abierto o cerrado y gracias al aumento de las combinaciones de estos se obtiene la tensión de salida de las tres fases. Además, la tensión de salida se corresponderá con el valor de referencia introducido en continua en este caso entre $+V_d$ y $-V_d$.

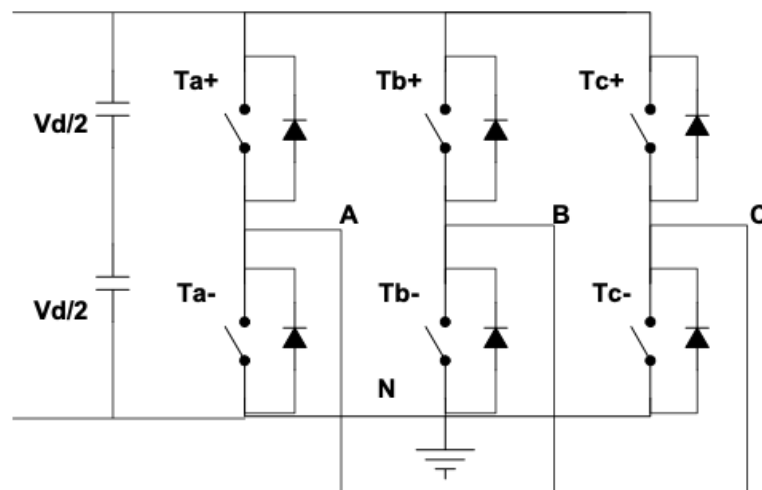


Fig. 4 Inversor trifásico de dos niveles [16]

Este es el inversor trifásico más sencillo, sobre los que se han realizado multitud de estudios. El control de los interruptores es uno de los aspectos más importantes, ya que en función de su activación la forma de onda obtenida de la tensión de salida varía. El control más comúnmente conocido es el PWM [13] (Pulse-width modulation) donde una onda triangular se compara con tres ondas sinusoidales desfasadas 120 grados para obtener una tensión de fase como la que se muestra en la Fig. 5.

Por otro lado, existe una gran variedad de literatura que clasifica los inversores trifásicos de acuerdo con otros criterios, como por ejemplo en VSI y CSI (fuentes de tensión y de corriente) [14]. En otras ocasiones, se clasifican en función de la modulación que se lleva a cabo. En este trabajo se ha mencionado la PWM por ser la más habitual, pero existen otras como la modulación por onda cuadrada y la modulación por tercer armónico, entre otras.

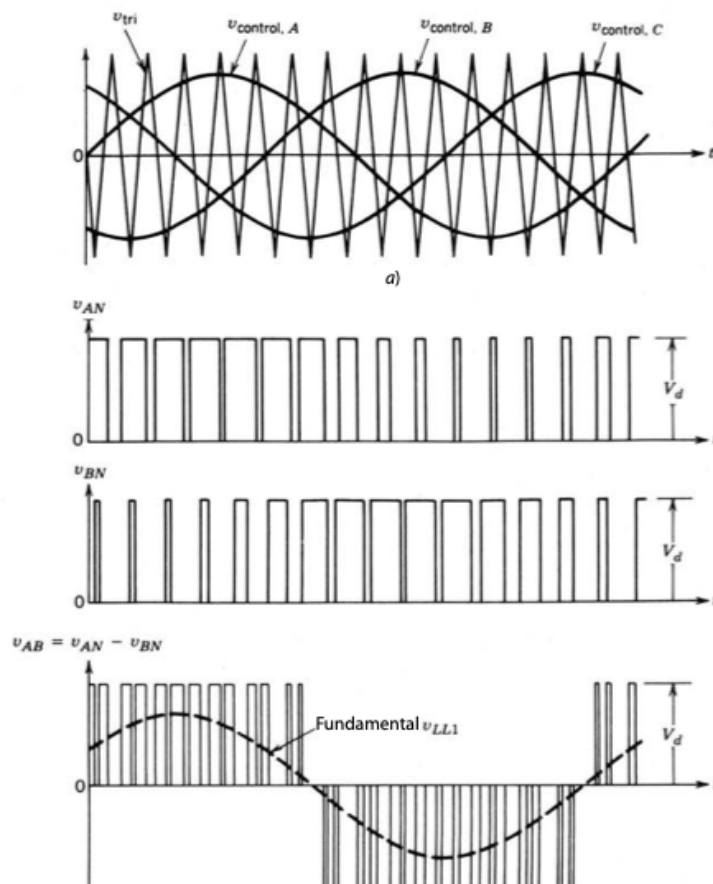


Fig. 5 Modulación de ondas

2.3 Interacción con la red

Una vez se ha comentado la tendencia a la integración de energías renovables y su relación con la estabilidad de red, así como su problemática y los modelos de inversores, conviene repasar los modos de interacción de los inversores utilizados en la mayor parte de tecnologías renovables con la red. Se clasifican en grid following y grid forming, y ambos modelos son clave en la transición energética a modelos con menos inercia y con desplazamiento de grandes generadores síncronos.

2.3.1 Grid Following

Los inversores grid-following o seguidores de red actúan como una fuente de corriente conectada a la red en paralelo con una impedancia elevada [17], la cual recibe información en magnitud y ángulo del comportamiento de la red para sincronizar la planta. Este sincronismo se obtiene gracias a un sistema de control capaz de transformar la referencia obtenida en una serie de ordenes transmitidas al inversor y de las que depende la generación. Es por esto, que los inversores cuyo modelo de conexión es grid-following dependen de las condiciones en las que se encuentra la red en cada instante. En la figura Fig. 6 se muestra el modelo simplificado de control de este tipo de inversor:

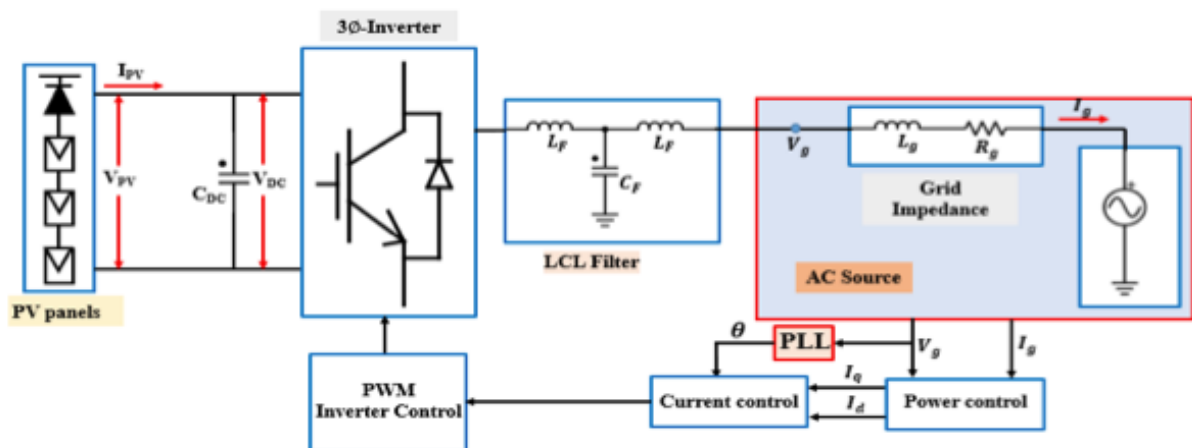


Fig. 6 Modelo simplificado del control de un inversor grid-following [17]

En la figura superior, se representa de forma sencilla un inversor generador de un sistema fotovoltaico conectado a la red por medio de un filtro de armónicos LCL, la red se representa por su equivalente thévenin. De forma resumida, este modelo se basa en un bucle interno de corriente y otro externo de tensión y mediante un PLL (Phase-locked loop) se consigue el seguimiento de la frecuencia. El PLL es el responsable de suministrar la información necesaria al bloque de corriente en función de las referencias de fase y magnitud de la tensión del punto común de la red en la que se conecta. La principal ventaja de este inversor es el número reducido de IGBTs que necesita en comparación a otras topologías, aunque su calidad de red puede ser en comparación inferior. Así mismo esta tipología puede presentar problemas de funcionamiento, sobre todo de resonancia [17] en armónicos de alta frecuencia. En la figura Fig. 7 se pueden ver los dos bucles a los que se hacía referencia:

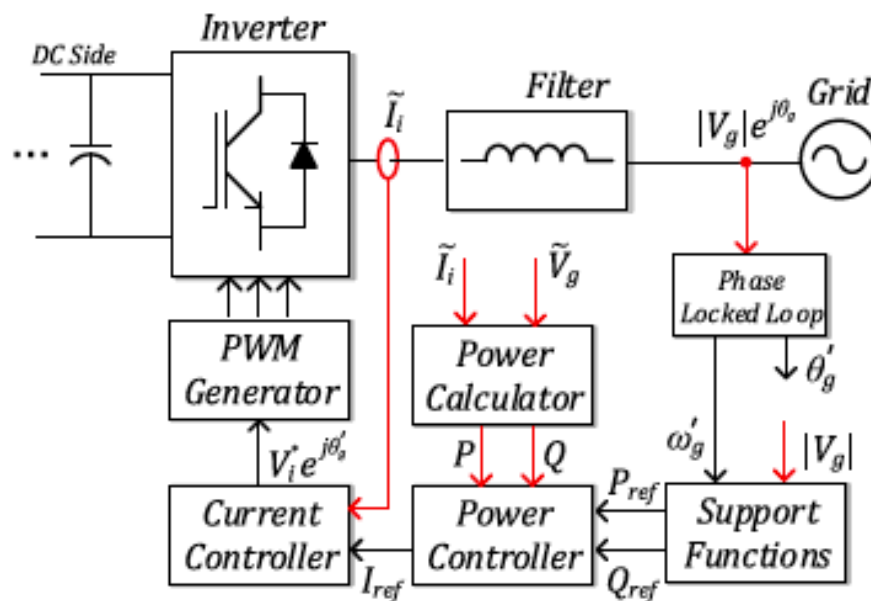


Fig. 7 Diagrama de bloques de un inversor Grid-Following [18]

2.3.2 Grid forming

El inversor grid-forming o “formador de red” actúa como una fuente de tensión capaz de crear una red propia, en un sistema aislado, o conectado a la red para ayudar a mantener los valores de frecuencia y tensión de referencia y proporcionando estabilidad

de un modo similar a un generador síncrono. Esto se debe a que ante una situación de desequilibrio este control es capaz de aumentar o reducir la potencia de salida para contribuir a mantener los parámetros estables [18]. Sin embargo, cuando funciona en isla, es el control seleccionado el que se encarga de determinar los valores de red. En la Fig. 8 se muestra el diagrama de bloques donde se introduce el droop control que ha sido objeto de estudio en trabajos previos del departamento [19].

La principal diferencia respecto al grid-following está en su capacidad para mantener la estabilidad de la red, mediante el control de la tensión y de la frecuencia. Gracias a esto, pueden funcionar en isla, dar suministro a una microrred, combinarse con sistemas de almacenamiento y conectarse a la red.

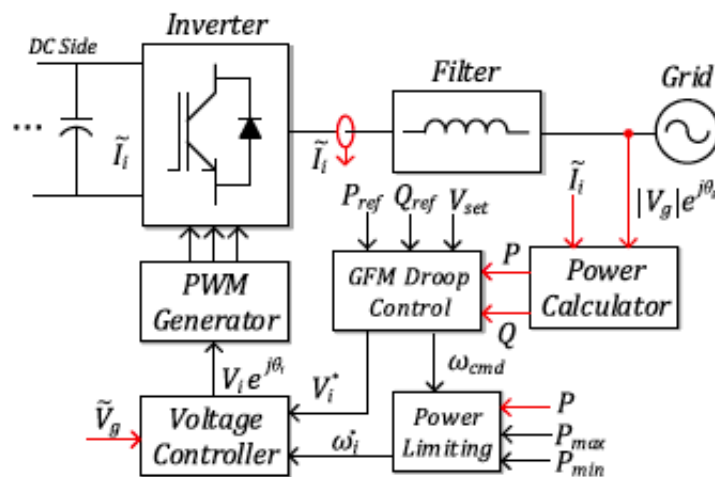


Fig. 8 Diagrama de bloques de un inversor Grid-Forming [18]

Cabe destacar que el control grid-following necesita de una red estable para establecer unas referencias de fase y tensión adecuadas y así controlar la potencia inyectada. Por eso, a la hora de utilizar este control es necesario que introduzca junto con otros generadores que aporten equilibrio en tensión y frecuencia, es decir, junto con generadores síncronos o inversores grid-forming. A pesar de esta desventaja, se siguen estudiando diferentes métodos para que este tipo de inversores puedan aportar estabilidad a la red a los que se conoce como sistemas auxiliares de control [17], que se integran junto al grid-following para mantener la estabilidad de la red.

Por otro lado, la regulación de tensión y de frecuencia llevada a cabo por el control grid-forming los convierte en uno de los principales candidatos para el funcionamiento en microrredes (actualmente utilizada en centros militares, pequeños asentamientos, etc.), unidos a sistemas de almacenamiento y conectados a red, ante la alta integración de generación distribuida, ya que además no necesitan de una interconexión con el resto de los generadores.

En este trabajo, se modela un sistema basado en el inversor con control grid-following real utilizado en otros trabajos [5], para el que se diseña un filtro de armónicos LCL.

Capítulo 3. Diseño del modelo

El objetivo del capítulo es el desarrollo de un modelo de inversor como sistema multivariable para obtener un inversor equivalente apropiado para el estudio de la estabilidad de red que permita considerar las características de la red (impedancia de red, existencia de otras unidades en paralelo, etc.) que no se tienen en cuenta en el diseño del control a priori. El inversor considerado está basado en tecnología SiC diseñado en el laboratorio y se considera conectado a su red [5], que en este caso es extremadamente débil. La tecnología SiC permite el desarrollo de convertidores con elevadas densidades de potencia y energía debido fundamentalmente a que conmutaciones pueden ser muy elevadas y, por tanto, al ser la frecuencia de conmutación tan elevadas, los inductivos asociadas puede reducir su volumen y peso de forma significativa (unas 10 veces más pequeño). El inversor utiliza MOSFET de SiC de última tecnología (8"), capaces de trabajar a elevadas potencias y frecuencias de conmutación con pérdidas reducidas reduciendo el tamaño de los convertidores y haciendo de estos un sistema muy competitivo en el mercado energético.

En este apartado, se desarrolla el modelo de control diseñado basado en bibliografía [20] y adaptado al caso de estudio. Se considera un solo inversor conectado a una red de laboratorio, pero con el objetivo de crear una herramienta rápida y eficaz para en futuros estudios poder simular varios inversores conectado a una misma red y así poder prever su comportamiento antes de hacerlo real.

3.1 Descripción del modelo

En este primer apartado, se describe el modelo implantado y las decisiones de diseño que se han tomado, así como la representación en modelo continuo de cada una de las partes.

Tabla 1 Bloques del modelo

Bloque	Descripción
P_i	Controlador Proporcional Integral
D_s	Aproximación de Padé
Y_1	Función de transferencia $-I_2/V_1$
Z_{red}	Impedancia red de laboratorio
F_v	Filtro EMA. Medida de tensión
F_i	Filtro EMA. Medida de intensidad

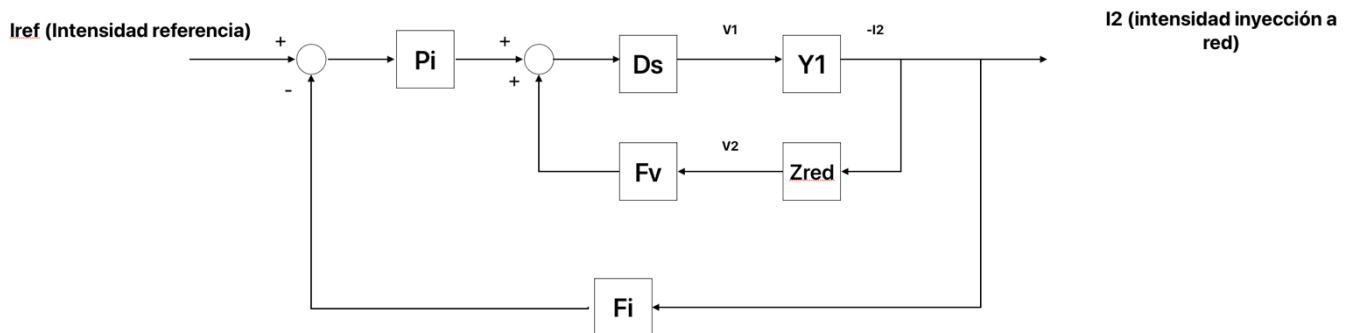


Fig. 9 Diagrama de bloques del modelo

En la Fig. 9 se muestra el esquema de control caracterizado por dos bucles principales que se comentarán más tarde ya que en primer lugar se van a describir los bloques utilizados para clarificar el modelo.

3.1.1 Aproximación de Padé

Una de las primeras decisiones para el diseño es el tipo de modelo a implementar: continuo o discreto. En este caso, se escogió trabajar en modelo continuo gracias a las ventajas que aporta su uso. Entre ellas, se encuentra la facilidad para el estudio de la estabilidad mediante métodos como el lugar de las raíces, Nyquist o simplemente aplicando una entrada escalón. Además, permite un fácil diseño en el dominio de la frecuencia ya que mediante la descripción gráfica de una función de transferencia (Salida/Entrada) conocido como diagrama de Bode se conoce el comportamiento del sistema en un amplio rango de frecuencias.

Por otro lado, la implementación de un modelo continuo supone introducir un retardo en el cálculo de la señal ya que los convertidores que se modelan de forma digital en modelo continuo introducen un retraso debido a los cálculos realizados por el microprocesador. En un sistema discreto esto ya se tiene en cuenta. En el dominio de la frecuencia compleja (s), se representa con $e^{-T_s \cdot s}$, siendo T_s el retardo (tiempo de muestreo del dispositivo). Además, en el proceso de discretización la señal se muestrea y se mantiene su valor durante el tiempo de muestreo como indica la Fig. 10, para considerar este efecto se emplea la retención de orden cero (*zero order hold – señal ZOH en rojo*).

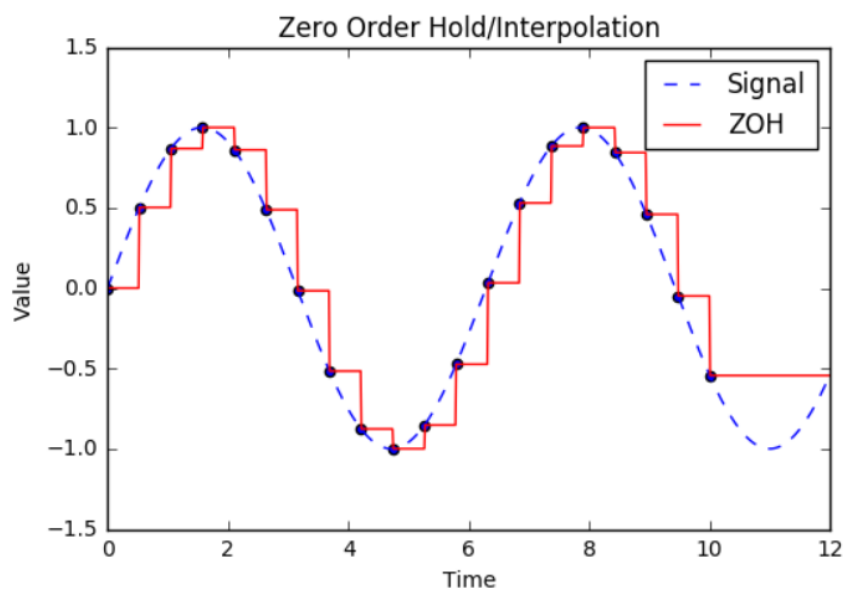


Fig. 10 Proceso de discretización de la señal

Su representación en modelo continuo es como se muestra a continuación:

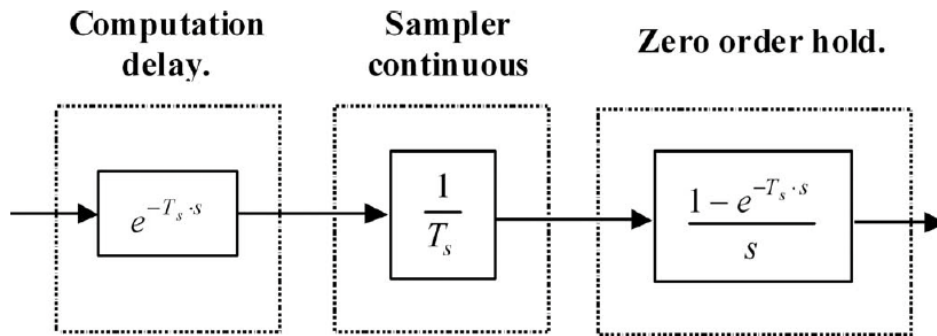


Fig. 11 Representación de la retención de orden cero

De su multiplicación (aplicación en cascada de cada proceso) se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$D_s = \frac{e^{-T_s \cdot s} \cdot (1 - e^{-T_s \cdot s})}{T_s \cdot s} \quad (7)$$

Esta función de transferencia representa el retardo de orden cero, pero ante la aparición de términos irracionales como es la exponencial, se busca una aproximación que implique un comportamiento similar eliminando de la función estos términos. Se utiliza la aproximación de Padé para aproximar la exponencial [20]:

$$e^{-T_s} \approx \frac{(1 - s \cdot 0,5 \cdot T_s)}{(1 + s \cdot 0,5 \cdot T_s)} \quad (8)$$

Quedando la función de transferencia utilizada en el modelo de la siguiente forma:

$$D_{s2} = \frac{(1 - 0,5 \cdot s \cdot T_s)}{(1 + 0,5 \cdot s \cdot T_s)^2} \quad (9)$$

Como T_s se corresponde con el periodo de muestro, en este caso se ha seleccionado un valor de 0,01 ms obtenido del modelo real.

3.1.2 Planta modelo

Se conoce con este nombre a la función de transferencia que engloba al filtro LCL diseñado en trabajos previos [5] junto con las impedancias de la red. El filtro pasivo utilizado se encarga de mantener el nivel de armónicos entre los rangos permitidos para la conexión a red. Es necesario ya que las ondas PWM utilizadas en los convertidores introducen un elevado valor de armónicos a diferentes frecuencias en la red. Esto unido al uso de estos convertidores en aplicaciones renovables y el aumento de estas, hace que la legislación sea estricta con los armónicos que introducen las señales en la red. El siguiente circuito ilustra el filtro comentado:

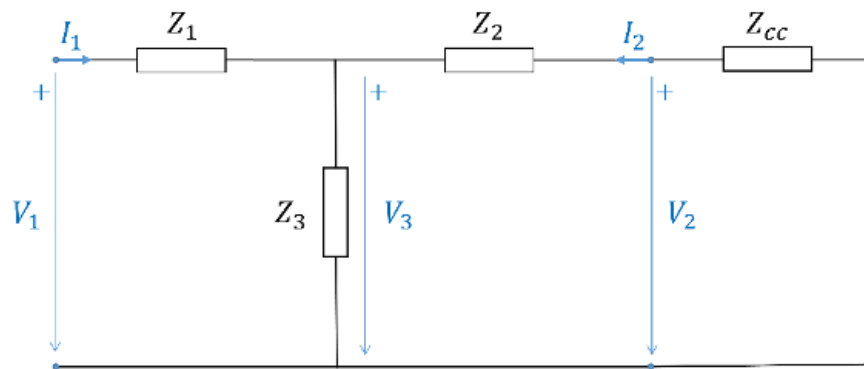


Fig. 12 Circuito filtro LCL [5]

En la siguiente tabla se indican los parámetros necesarios para entender el filtro:

Tabla 2. Descripción de los parámetros que intervienen en el circuito

Parámetro	Descripción
I_1	Intensidad salida inversor
V_1	Tensión salida inversor
Z_1	Impedancia lado inversor
Z_2	Impedancia lado red
Z_3	Impedancia de amortiguamiento
Z_{cc}	Impedancia de red
V_2	Tensión conexión a red
I_2	Intensidad conexión a red

A diferencia de la bibliografía utilizada [20], en este trabajo se pretende controlar la intensidad de conexión a la red en función de tensión de salida del inversor, de forma que en [5] se indican los cálculos realizados para obtener la función de transferencia en función de las impedancias antes comentadas. En el caso analizado en este trabajo, también se tienen en cuenta la impedancia de red (red de laboratorio) que más tarde se comentará, aunque en la literatura se considera en muchas ocasiones que la tensión V_2 (salida del filtro) es cero, debido a que la impedancia de red es 0. Esto solo se considera en situaciones de red ideal.

La función de transferencia depende de los valores de las impedancias introducidos. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores de la impedancia de amortiguamiento.

3.1.3 Impedancia de red

Otro de los bloques considerado en el modelo es la impedancia de red del laboratorio a la que se conecta el inversor objeto de estudio. Los valores de la impedancia de red se midieron en trabajos previos [5], obteniéndose los siguientes valores que se utilizan en este trabajo:

Tabla 3. Valores que modelan la impedancia de red

Parámetro	Valor	Descripción
R_{cc}	50,7 mΩ	Resistencia de la red
L_{cc}	1,14 mH	Inductancia de la red
L_{Trafo}	1 mH	Inductancia del transformador

La función de transferencia que caracteriza la impedancia de la red es la siguiente:

$$Z_{cc} = R_{cc} + (L_{cc} + L_{trafo}) \cdot s \quad (20)$$

3.1.4 Filtros EMA

Los filtros EMA (Exponentially Moving Average) se utilizan para medir las referencias de tensión e intensidad a la salida del control y cerrar los bucles de realimentación. Se corresponden con el bloque F_i y F_v del diagrama de bloques y los valores de la función de transferencia se corresponden con el modelo real que se comenta:

$$F_v = F_i = \frac{0,07692 + 8003}{s + 8003} \quad (11)$$

3.1.5 Control Proporcional Integral

El controlador PI actúa generando una acción proporcional al error calculado tras comparar dos señales de entrada. En este caso, se comparan la intensidad de referencia y la intensidad de salida del filtro realimentada en el bucle externo

La función de transferencia que modela este bloque se obtiene del modelo real implementado en el inversor con control grid-following:

$$P_i = \frac{0,9 \cdot s + 1,52}{s} \quad (12)$$

3.2 Descripción del comportamiento del control

En la Fig. 9 se puede ver el diagrama de bloques que modela el sistema en estudio. Existen dos bucles de realimentación, uno externo y otro interno, en función de la variable que se quiera realimentar. El bucle interno realimenta de forma positiva la tensión de salida del filtro (V_2) o de conexión a la red. Esta, se suma a la acción proporcional generada por el controlador Pi para enviar la señal al retardo de orden cero. Por otro lado, la realimentación exterior consiste en una medida de la intensidad de salida del filtro para compararla con la intensidad de referencia introducida al sistema. De esta forma, se calcula el error que se transmite al controlador proporcional integral que manda la acción necesaria para ajustar la señal.

Capítulo 4. Resultados

Tras describir el modelo creado para estudiar la estabilidad del sistema, en este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante Matlab y Simulink y su comparación con el modelo real del inversor y su conexión a la red de laboratorio.

Antes de exponer los resultados, se describe de forma breve los criterios de estabilidad empleados para analizar el sistema: lugar de las raíces, Nyquist y la aplicación de un step o entrada en escalón.

4.1 Criterios de Estabilidad

4.1.1 Lugar de las raíces (Rlocus)

El lugar de las raíces es un método que permite estudiar la dinámica de un sistema en bucle cerrado a través de su función de transferencia en bucle abierto. Para ello, se basa en una representación gráfica que muestra las raíces de la ecuación característica del sistema en función de un parámetro determinado o ganancia [21]. También es una herramienta útil para el diseño ya que gráficamente puede mostrar la estabilidad del sistema en bucle cerrado tras añadir o quitar polos y ceros en bucle abierto o mediante la modificación del valor de la ganancia.

La ecuación característica de un sistema con una función de transferencia en la cadena directa $G(s)$ y en la realimentación $H(s)$ es:

$$1 + G(s) \cdot H(s) = 0 \quad (33)$$

Esta ecuación proviene de la expresión utilizada para obtener la relación entre la entrada $C(s)$ y la salida $R(s)$ del sistema antes mencionado:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (14)$$

De la ecuación característica, se obtienen las condiciones de magnitud y ángulo que deben cumplir los polos en lazo cerrado del sistema. El lugar de las raíces se construye gracias a la condición de ángulo mientras que la de magnitud se utiliza para conocer el valor de la ganancia para un punto perteneciente al lugar de las raíces.

$$G(s) \cdot H(s) = \pm 180^\circ(2k + 1) \quad k = 0,1,2,3, \dots, \quad (45)$$

$$|K \cdot G(s) \cdot H(s)| = 1 \quad (56)$$

En este trabajo, debido a la complejidad de las funciones de transferencia empleadas se utiliza Matlab para graficar el lugar de las raíces y conocer la estabilidad del sistema.

4.1.2 Nyquist

El criterio de estabilidad de Nyquist es capaz de determinar la estabilidad de un sistema en bucle cerrado relacionando la respuesta en frecuencia en lazo abierto con el número de polos y ceros de la ecuación característica [21]. Para ello, utiliza una representación en el plano complejo transformando los puntos del plano s a puntos en el plano $F(s)$ que viene de la ecuación característica del sistema, y se evalúa en función de la frecuencia w .

Este criterio, se expresa de forma sencilla de la siguiente forma:

$$Z = N + P \quad (17)$$

Donde:

Z = número de ceros de la ecuación característica en el semiplano derecho del plano s .

N = número de vueltas en sentido horario sobre el punto crítico $-1+j0$

P = número de polos situados en el lado derecho en lazo abierto.

Como en el caso del lugar de las raíces, Matlab cuenta con herramientas muy potentes para representar el diagrama de Nyquist y obtener resultados muy precisos.

4.2 Resultados Matlab

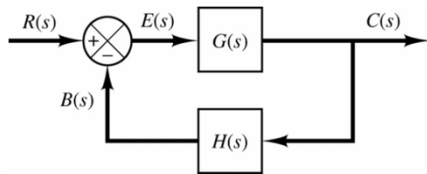
En este apartado, se exponen los resultados de estabilidad del modelo objeto del estudio y comentado en el Capítulo 3, es decir, un inversor de tecnología SiC ensayado experimentalmente en [5]. Se ha evaluado la estabilidad para dos valores del condensador del filtro LCL de armónicos: 2 μF y 20 μF . Con estos valores se ha variado el valor de R_3 (resistencia de amortiguamiento del filtro y conectado en serie con el condensador) para analizar su influencia en la estabilidad. Se ha comprobado la estabilidad con los tres criterios antes comentados y se han analizado los resultados. Los datos utilizados en la simulación se indican en la Tabla 4:

Tabla 4 Valores de simulación

Parámetro	Valor	Descripción
L_1	142 mH	Inductancia del lado del inversor
R_1	1,14 m Ω	Resistencia interna L_1
L_2	1 mH	Inductancia del lado de la red
R_2	0,0035 m Ω	Resistencia interna L_2
T_s	100 kHz	Frecuencia de muestreo
K_p	0,9	Constante proporcional - Pi
K_i	1,52	Constante integral - Pi

En primer lugar, se explica la metodología que se ha utilizado en Matlab para obtener los resultados de estabilidad. Como ya se ha comentado, se han utilizado tres métodos de estabilidad diferentes para compararlos y llegar a una conclusión. Previo a esto es necesario adecuar las funciones de transferencia para poder obtener resultados precisos con Matlab.

El modelo considerado (Fig. 9) cuenta con dos realimentaciones que ya se han comentado en el capítulo 3, donde se mide la intensidad y la tensión de salida. El primer paso consiste en cerrar el bucle interno que de forma analítica se haría de la siguiente forma:



$$\text{Bucle cerrado, } \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

Fig. 13 Función de transferencia de bucle cerrado

Pero Matlab ofrece la función *feedback* mediante la que se puede cerrar el bucle directamente. Además, esta herramienta simplifica la función de transferencia en lazo cerrado haciéndola más precisa en sistemas de orden elevado [22]. De la Fig. 9, el primer término ($D_s \cdot Y_1$) en la función *feedback* se corresponde con la cadena directa, el segundo con la realimentación ($F_v \cdot Z_{red}$), y el tercero indica que la realimentación es positiva.

$$FBC_1 = \text{feedback}(D_s \cdot Y_1, F_v \cdot Z_{red}, 1) \quad (18)$$

Por tanto, una vez cerrado el primer bucle el modelo queda como:

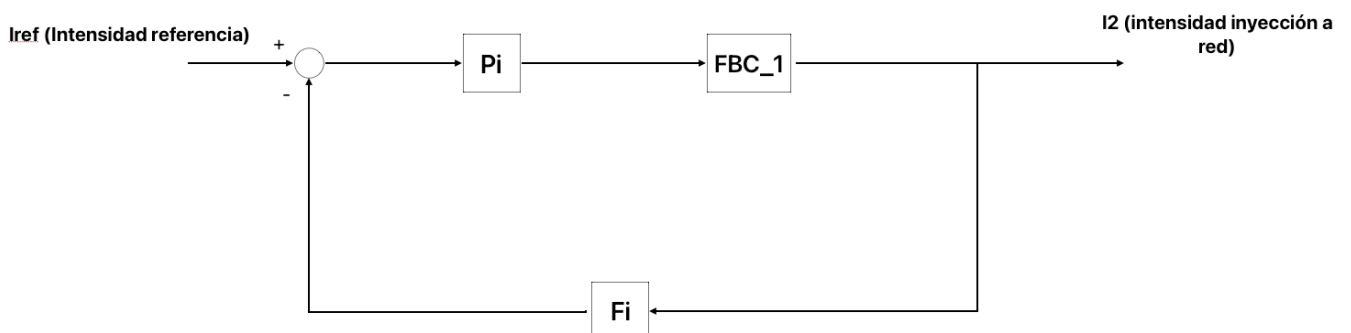


Fig. 14 Diagrama de bloques reducido

Donde FBC_1 es la función de transferencia del primer bucle cerrado. Así, usando el mismo método obtenemos la función de transferencia en bucle cerrado que se llamará FBC_2 :

$$FBC_2 = feedback(P_i \cdot FBC_1, F_i) \quad (69)$$

La función en bucle abierto que se utilizará para estudiar la estabilidad es:

$$FBA = P_i \cdot FBC_1 \cdot F_i \quad (20)$$

Una vez explicadas las herramientas utilizadas se comentan los resultados obtenidos para el inversor de tecnología SiC con los dos valores de R_3 .

4.2.1 Filtro con condensador de 2 μ F

El lugar de las raíces

Para este caso, se ha dejado fijo el valor del condensador y se ha ido variando el valor de la resistencia de amortiguamiento (R_3) hasta alcanzar el valor de 315 Ω , donde en los tres métodos se alcanza la estabilidad. Se escoge este valor límite para analizar los resultados.

En primer lugar, se utiliza el lugar de las raíces para determinar la estabilidad. Mediante la función *rlocus* de Matlab y la función de bucle abierto del modelo (FBA) se estudia el comportamiento del bucle cerrado, cuya representación se muestra en la Fig. 15.

A simple vista, se observan dos asíntotas (trazado verde y rojo de la Fig. 16) en el semiplano izquierdo por donde los polos correspondientes se pueden mover a medida que aumenta la ganancia K , que en el sistema objeto de estudio es 1. En el semiplano derecho sí que se observa una asíntota que podría hacer el sistema inestable si al aumentar la ganancia el polo se desplaza hacia este.

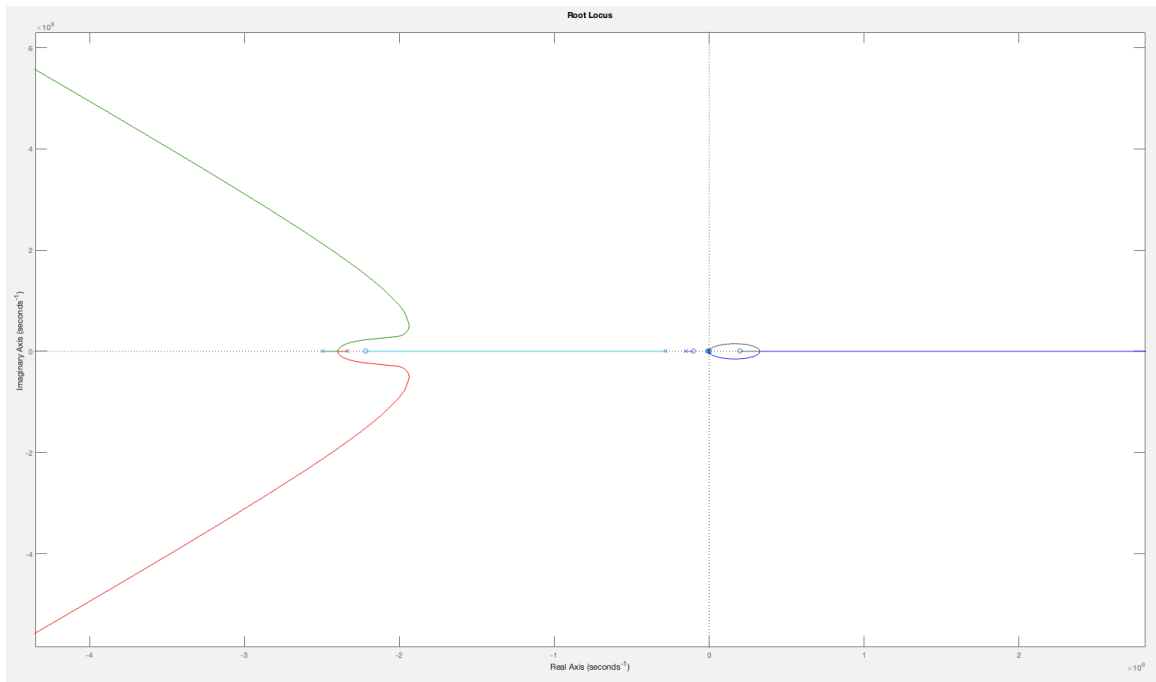


Fig. 16 Lugar de las raíces, dinámica completa

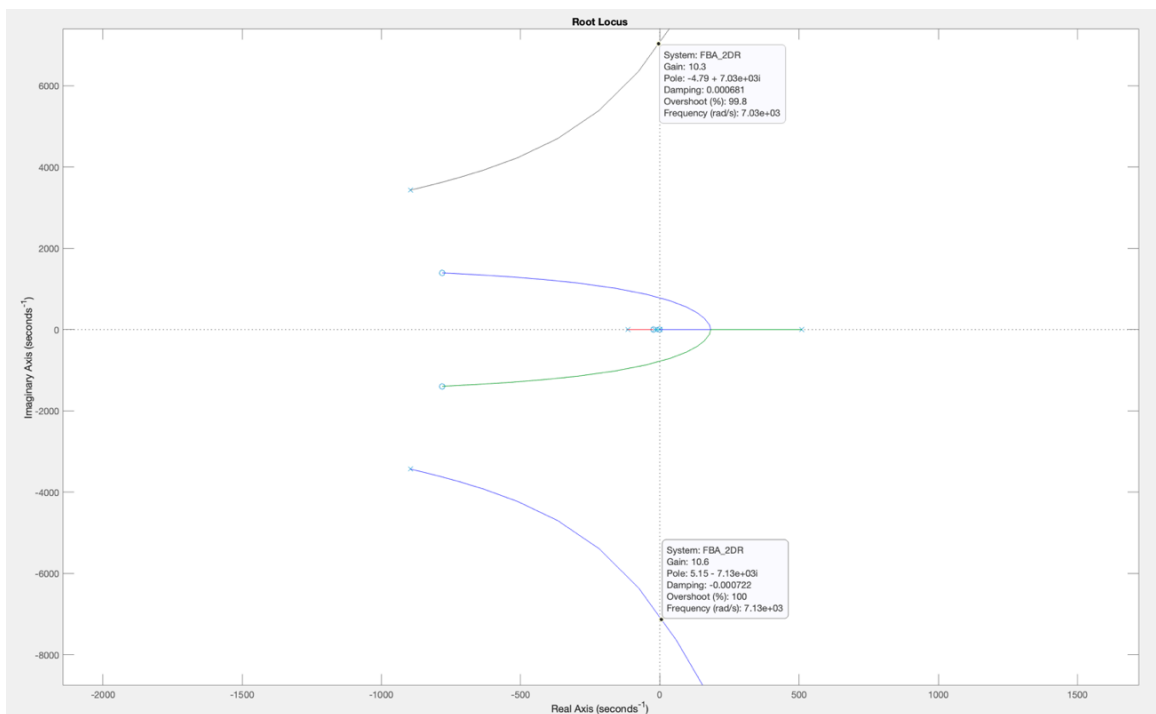


Fig. 15 Lugar de las raíces, dinámica dominante

Analizando la dinámica más cerca del eje imaginario en la Fig. 16 se obtienen las siguientes conclusiones:

Los polos más cercanos al eje imaginario son los más dominantes ya que afectan en mayor medida a la respuesta del sistema al tener constantes de tiempo superiores. En

la Fig. 16 se muestra el cruce de los polos por el eje imaginario hacia la asíntota que se encuentra en el semiplano derecho. El valor de la ganancia para el que pasaran al semiplano derecho es de entorno a 10, de forma que, en el sistema planteado, al ser k un valor 1 se encuentran en el izquierdo. Lo mismo ocurre con los polos inferiores en verde y en azul que cruzan el eje para un valor de ganancia 1.

Obteniendo el valor de los polos y ceros de la función de transferencia en bucle cerrado FBC_2 , aparecen dos polos en el origen y un cero en el semiplano derecho, así como polos complejos conjugados. Estos últimos afectan a la respuesta transitoria aportando sobre oscilación. Esto puede afectar a la dinámica transitoria del sistema como se observa en el estudio posterior de la respuesta a escalón. Con estas evidencias, se concluye que el sistema es marginalmente estable debido a la presencia del polo en el origen.

Nyquist

Con el criterio de estabilidad comentado en el apartado 4.1.2 , se analiza la función en bucle abierto y se obtiene un polo en el lado derecho, por tanto, según [21], el diagrama de Nyquist tiene que dar una vuelta sobre el punto crítico en el sentido contrario de las agujas del reloj. Mediante Matlab y la función *Nyquist*, a la que se le introduce la función en bucle abierto, se obtiene el diagrama:

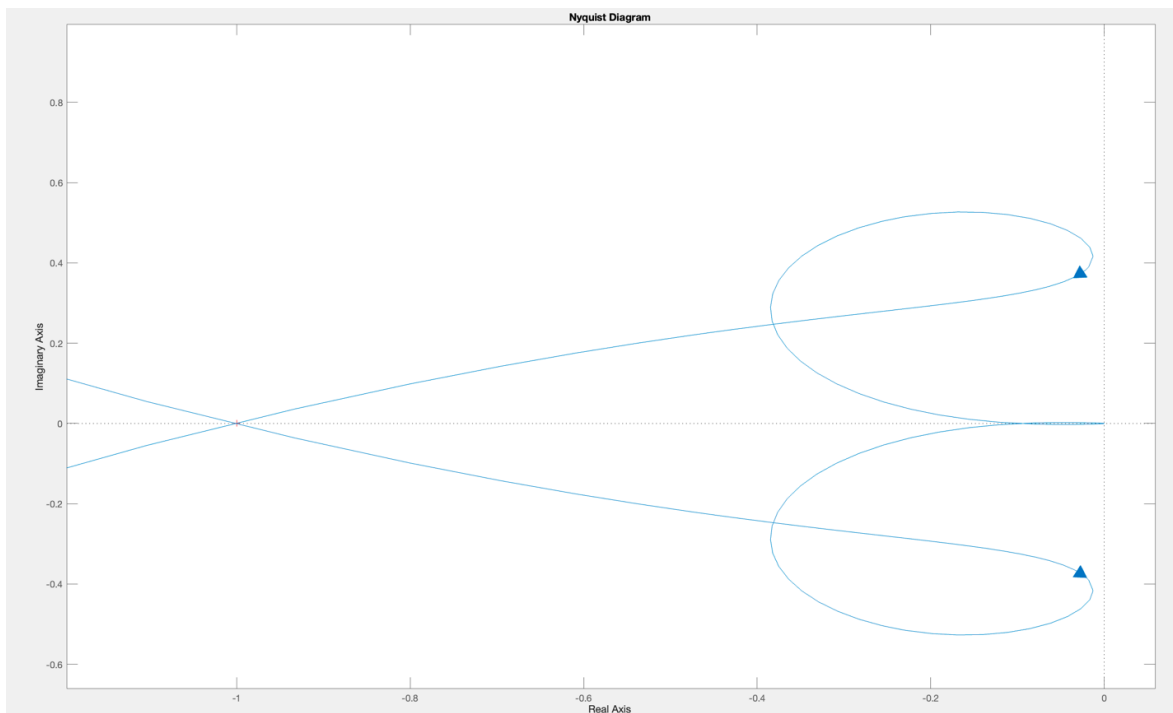


Fig. 17 Diagrama de Nyquist cerca del punto crítico

Ajustando la imagen, se puede ver que el diagrama de la Fig. 18 rodea al punto marcado en rojo o punto crítico $(-1 + j0)$ en sentido contrario a las agujas del reloj. Al ser el valor de la resistencia 315Ω , marca el límite de la estabilidad del sistema y hasta que no se amplía le diagrama no se observa el rodeo. En el Anexo A, se muestra un ejemplo para validar el criterio empleado.

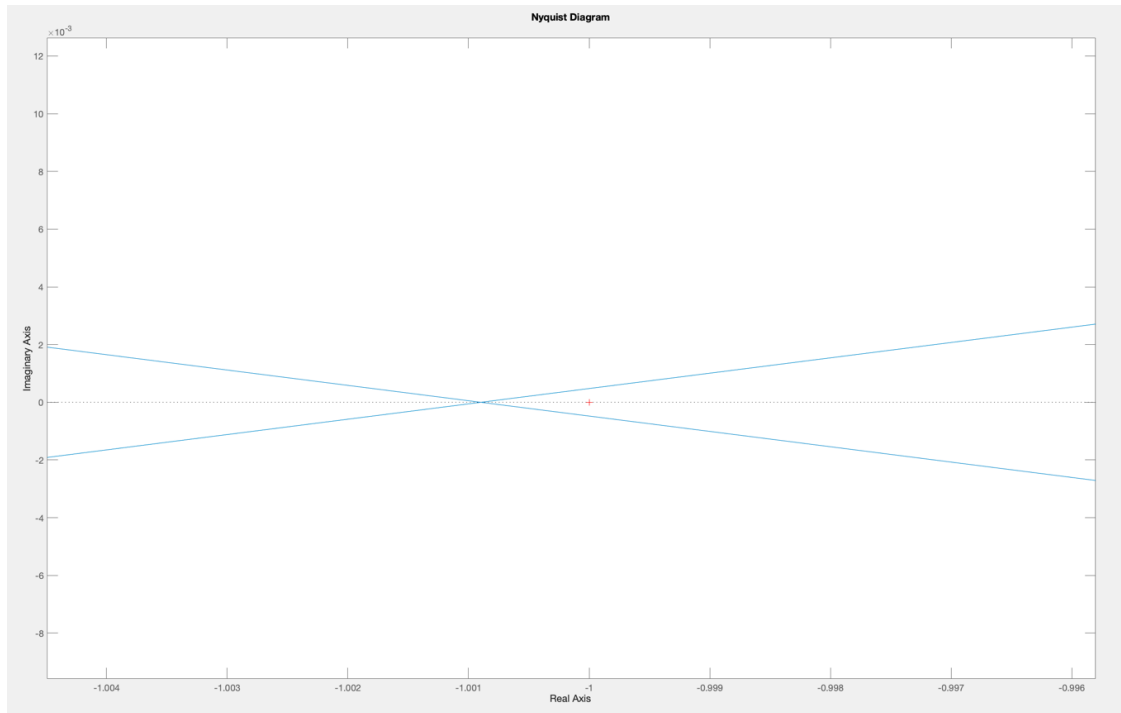


Fig. 18 Diagrama de Nyquist en el punto crítico

Luego, aplicando el criterio de estabilidad se obtiene un valor de Z igual a 0 lo que indica que el sistema en bucle cerrado será estable:

$$Z = N + P = -1 + 1 = 0 \quad (21)$$

Además, Matlab dentro de su herramienta gráfica de Nyquist también informa de la estabilidad del bucle cerrado como muestra la Fig. 19, dando los márgenes de ganancia y de fase para los que el sistema es estable. Por eso, en este caso también se puede concluir que el sistema es estable aplicando el criterio de Nyquist.

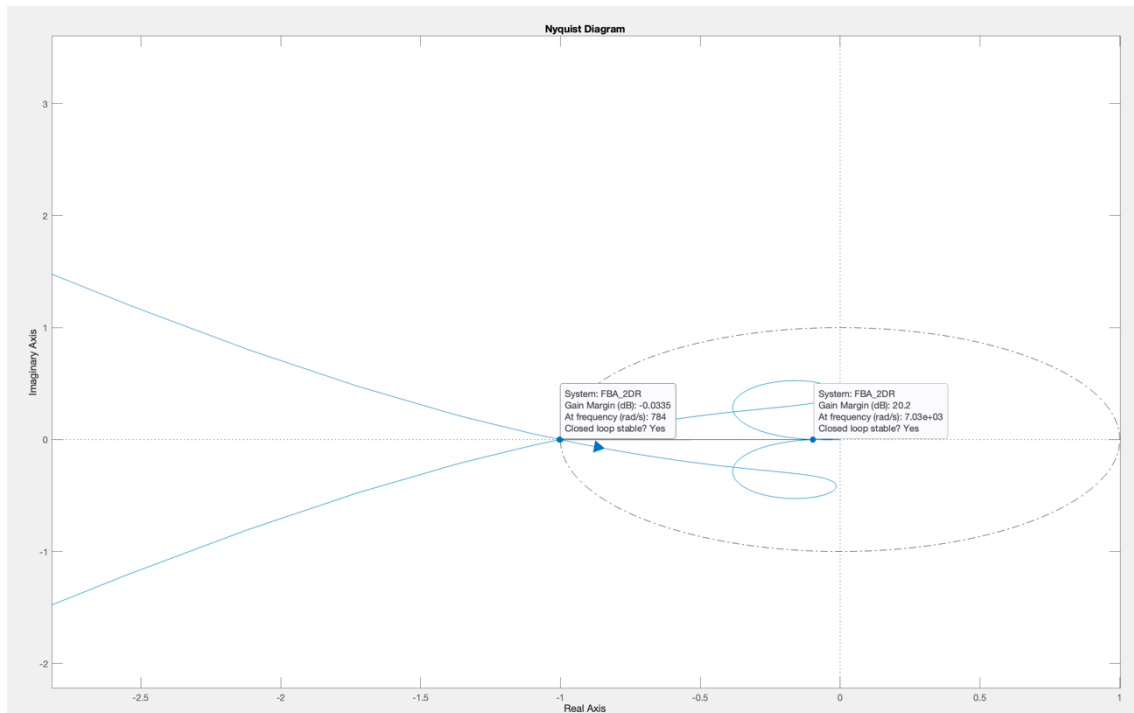


Fig. 19 Diagrama de Nyquist, confirmación de estabilidad

Respuesta a escalón

El análisis de estabilidad consiste en aplicar una entrada escalón a la función en bucle cerrado de la planta, es decir, a la función de transferencia que relaciona la intensidad de salida a la red (I_2) con la intensidad de referencia (I_{ref}). Mediante la función *step* se obtiene la respuesta al escalón de la Fig. 20. La sobre oscilación es muy elevada durante los primeros segundos de simulación además de tener una respuesta muy lenta. Esto se debe a la dinámica que introducen los polos conjugados en función de su factor de amortiguamiento.

Si se aumenta el valor de la resistencia de amortiguamiento hasta 340Ω la respuesta se vuelve más rápida y con menos sobre oscilación como se ve en la Fig. 21. Al final se alcanza en régimen permanente el valor unitario, por lo que se concluye que es estable en este caso.

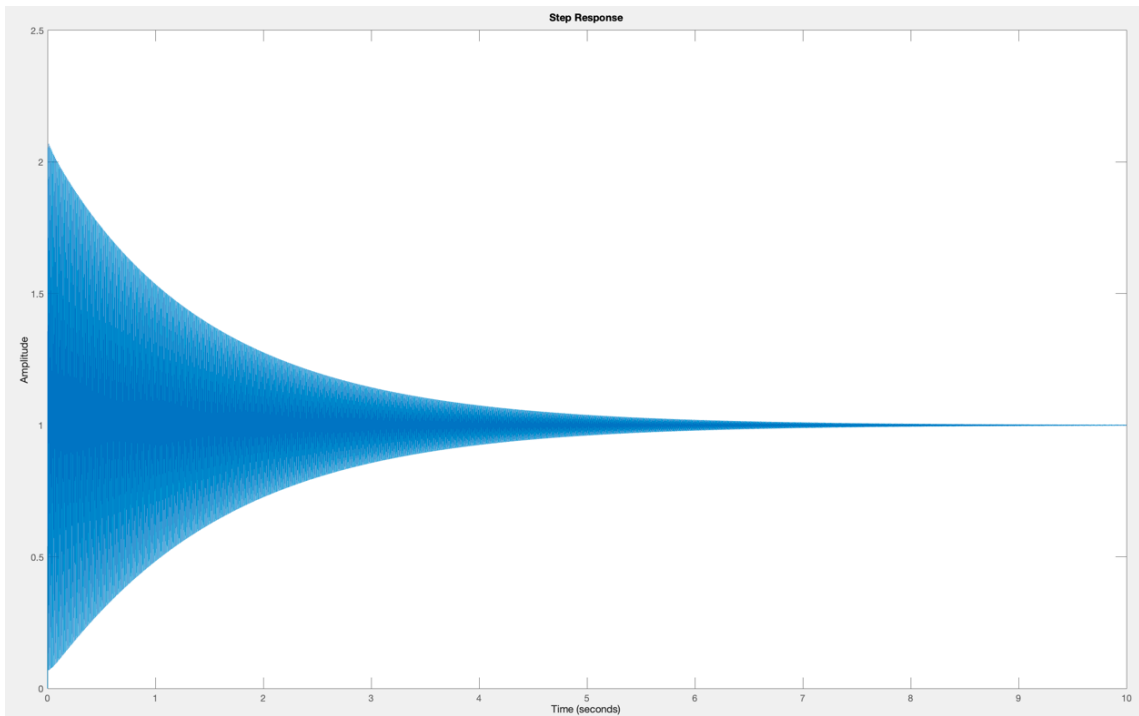


Fig. 20 Respuesta al escalón con resistencia límite

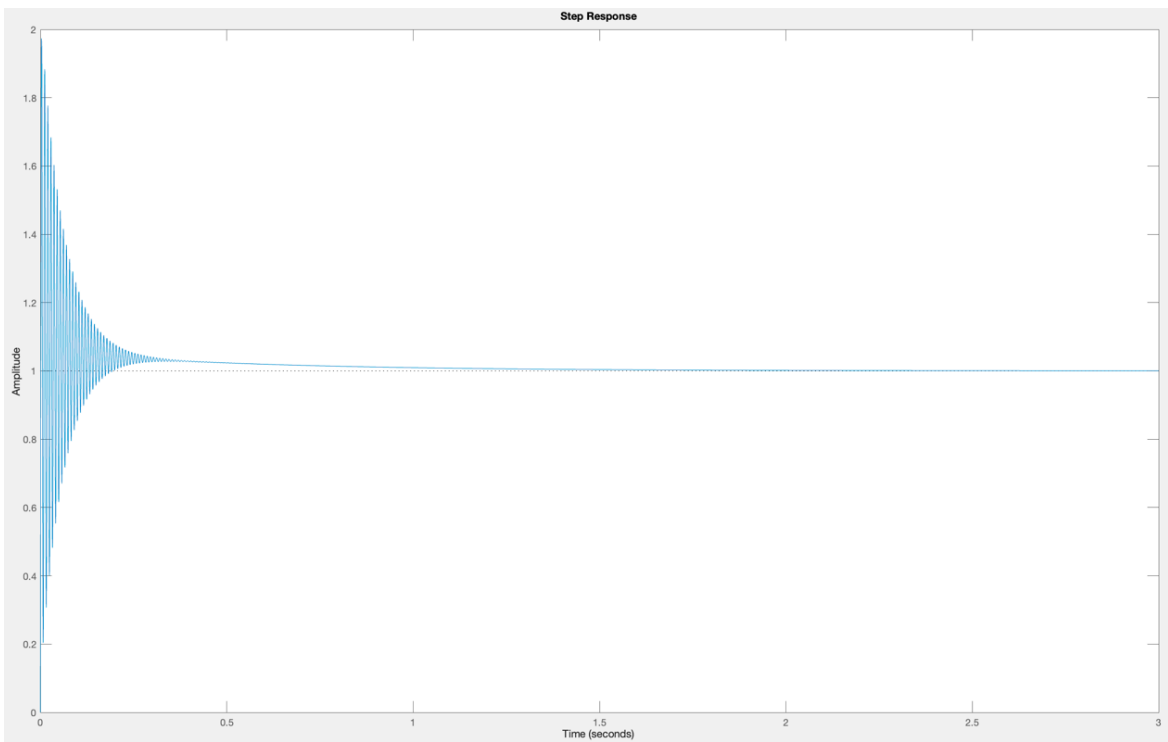


Fig. 21 Respuesta al escalón con resistencia más elevada

4.2.2 Filtro con condensador de 20 μF

El lugar de las raíces

Como en el caso anterior, se han variado los valores de la resistencia de amortiguamiento manteniendo un valor de 20 μF y el valor límite para el que se alcanza la estabilidad es para un valor de R_3 de 32 Ω .

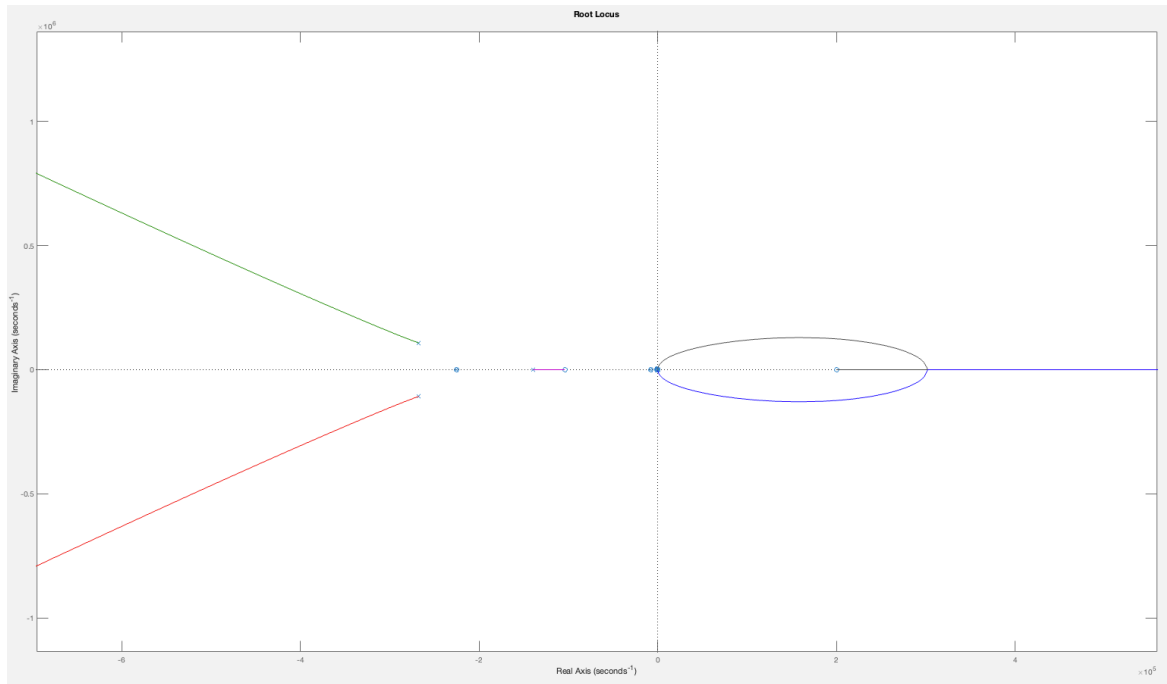


Fig. 22 Lugar de las raíces, dinámica completa

Se observan unos polos dominados en el semiplano izquierdo y dos asíntotas que a medida que aumenta la ganancia del sistema, en nuestro caso 1, se van al infinito. Estos polos dominados tienen menos influencia en la dinámica y son estables. Existe otra asíntota que se encuentra en el semiplano derecho que podría hacer el sistema inestable.

La Fig. 23, muestra la dinámica dominante del sistema, aquella que está más pegada al eje imaginario. Como la ganancia del bucle cerrado es 1, como ocurría en el caso anterior, los polos forman parte del semiplano izquierdo y se considera que la función en bucle cerrado es estable. La dinámica es muy parecida al caso de 2 μF , aunque los

valores de ganancia difieren, siendo en el primer caso de 10 y en este segundo de entorno a 7.5. Además, si se obtienen los polos en bucle cerrado también existen varios pares de polos conjugados que aportaran sobre oscilación al sistema y un polo en el origen que puede afectar a la respuesta ante perturbaciones.

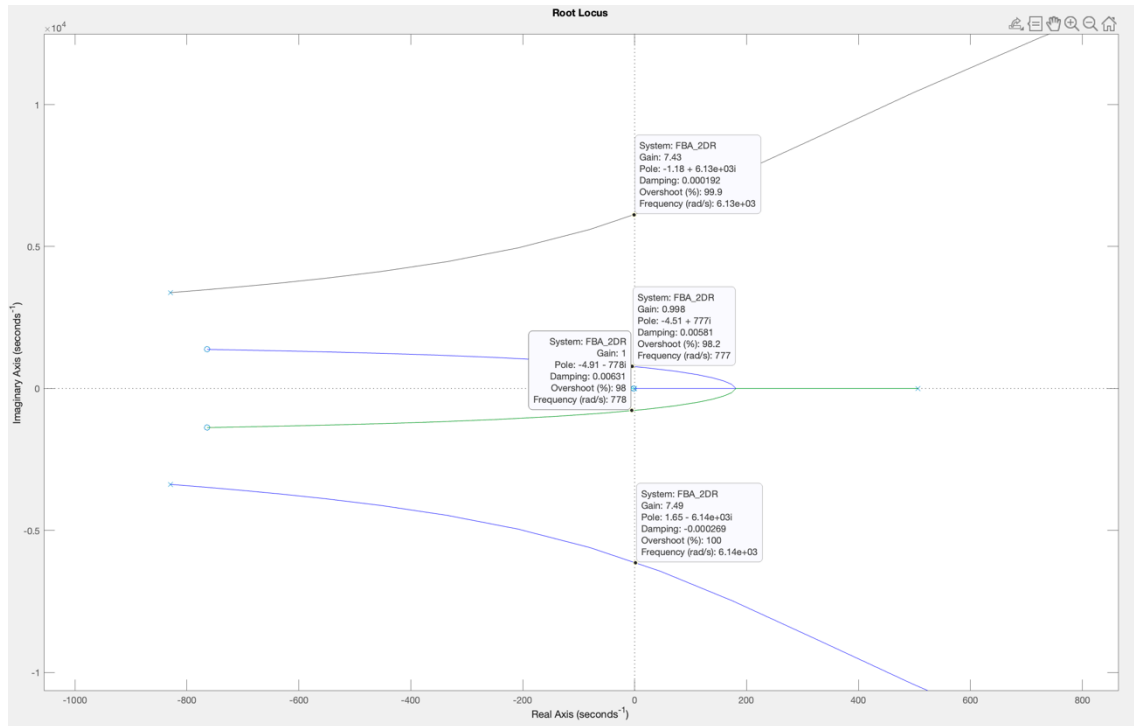


Fig. 23 Lugar de las raíces, dinámica dominante

Nyquist

Mediante la función *Nyquist* de Matlab y la obtención de los polos de la función de transferencia en bucle abierto, el criterio de estabilidad de Nyquist indica según la ecuación (22) que el sistema es estable ya que $Z=0$.

$$Z = N + P = -1 + 1 = 0 \quad (22)$$

Esto se debe a que existe un polo en el semiplano derecho de la función de bucle abierto y como se ve en la Fig. 24 el diagrama rodea en sentido antihorario al punto crítico (-

$1+j0$). Además, mediante la gráfica de Matlab de la función *Nyquist*, también se confirma la estabilidad del bucle cerrado (Fig. 25).

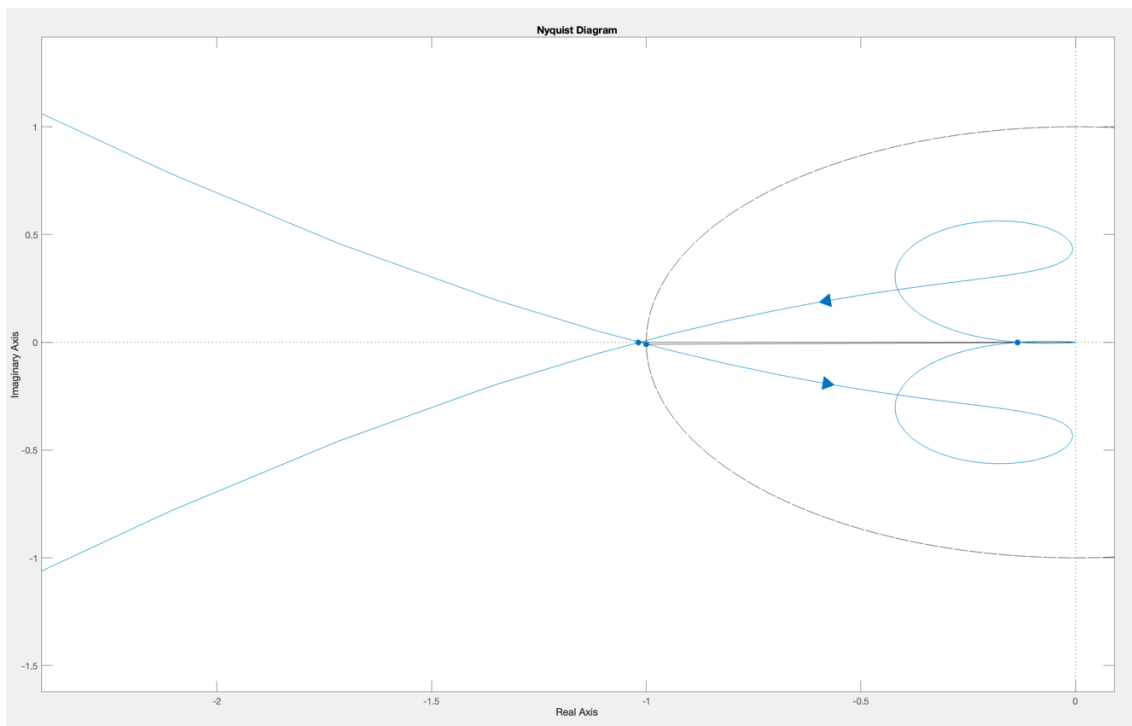


Fig. 24 Diagrama de Nyquist cerca del punto crítico

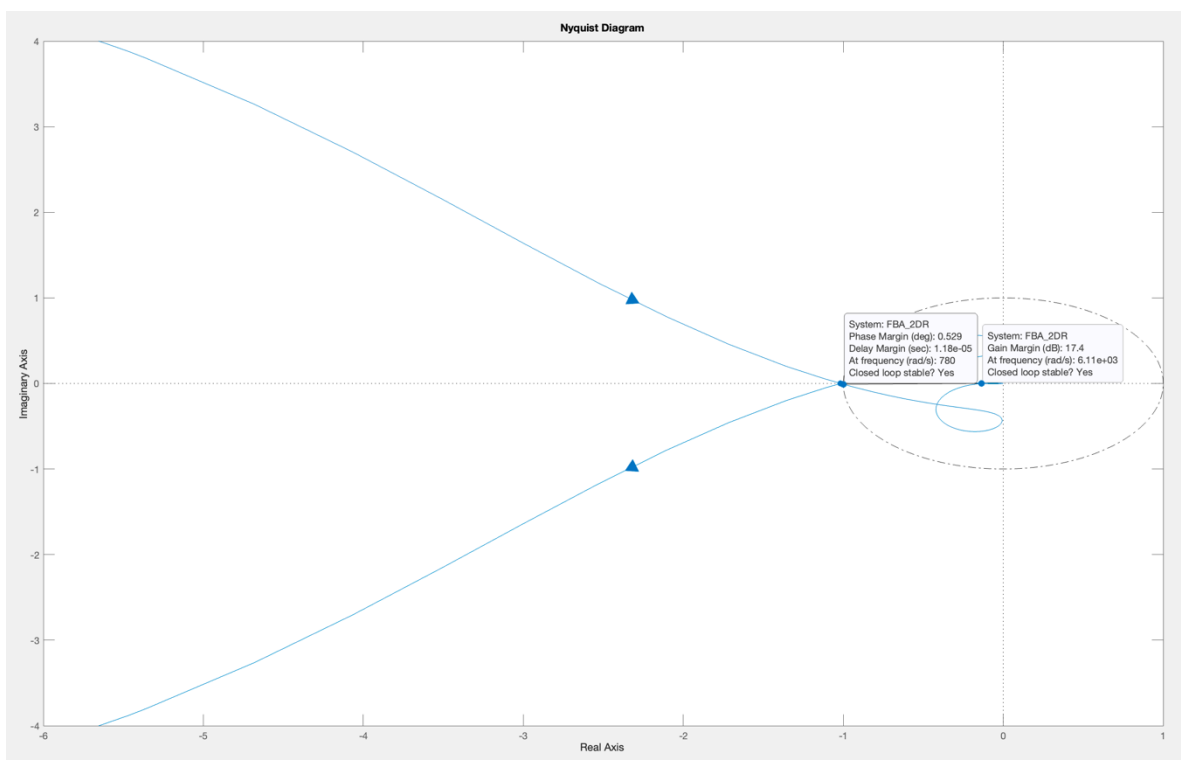


Fig. 25 Diagrama de Nyquist, confirmación de estabilidad

Respuesta a escalón

Finalmente, se comprueba la estabilidad aplicando una entrada escalón a la función de transferencia en bucle cerrado. Al igual que para el caso anterior, la Fig. 26 muestra la sobre oscilación causada por los polos conjugados. Esta representación, se obtiene para un valor de R_3 de 32Ω , pero a medida que se aumenta este valor, los polos que están más cerca de del eje imaginario, se desplazan por el eje real, convirtiéndose cada vez en más negativos. Esto se transmite en una menor sobre oscilación y menor tiempo de respuesta para obtener el régimen permanente. Un ejemplo es la Fig. 27 donde se ha utilizado una resistencia de 45Ω .

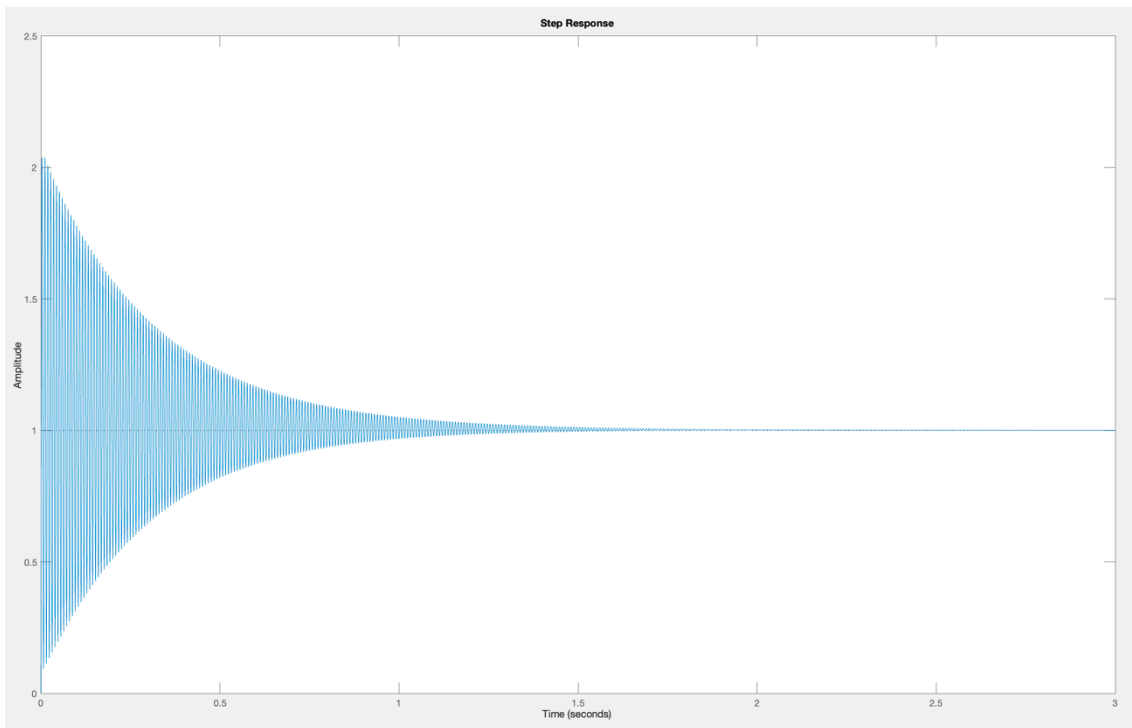


Fig. 26 Respuesta a escalón para resistencia límite

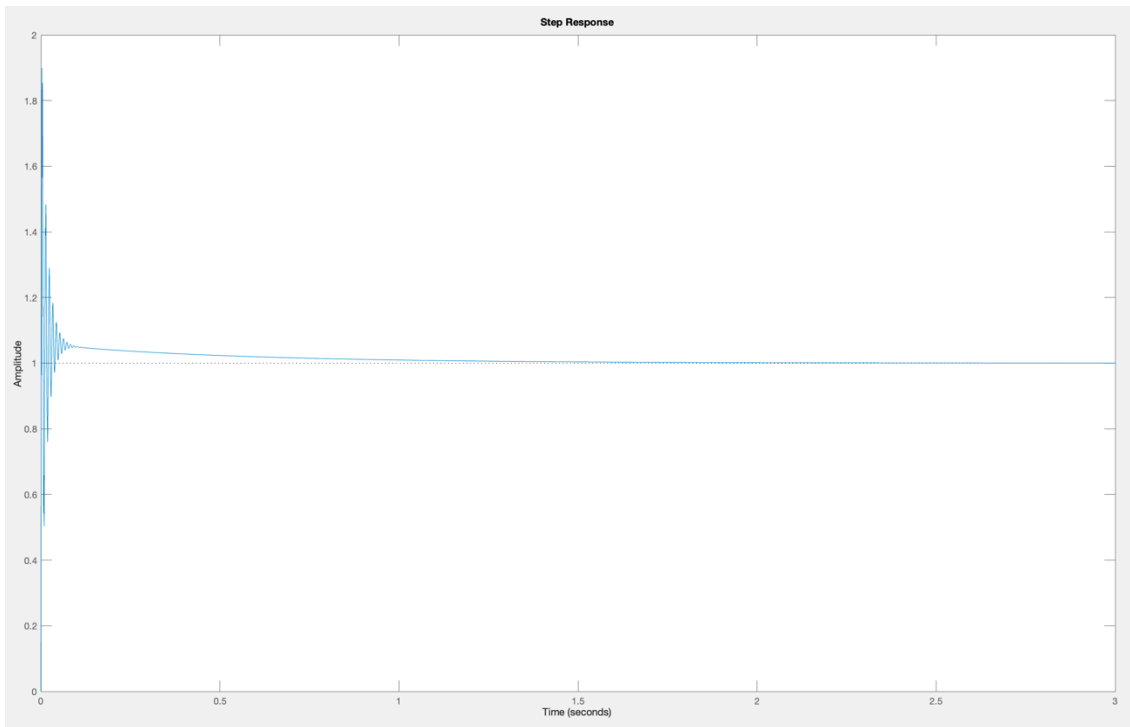


Fig. 27 Respuesta a escalón para resistencia más elevada

4.3 Comparación resultados Simulink

Con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos, se ha creado un modelo en Simulink con los diagramas de bloques del modelo antes comentado. Este permite obtener una visión rápida de la respuesta del sistema ante diferentes entradas de I_{ref} así como obtener respuestas en frecuencia de la parte que se desee. La representación se muestra en la Fig. 28.

Gracias a este diseño se pueden obtener resultados rápidos de la respuesta del sistema ya que la función de transferencia del filtro (en el diagrama de Simulink, Y1) está conectada con el script de Matlab, de forma que ante cualquier cambio en los datos incluidos en el script de Matlab (que se indica en el Anexo B) se ve reflejado en la función de transferencia del filtro que depende de las impedancias seleccionadas.

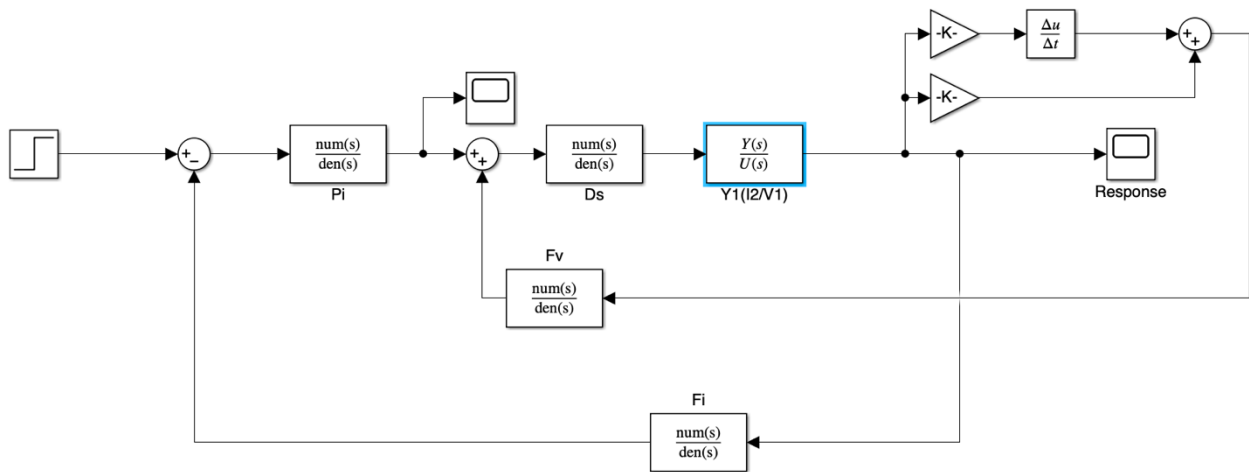


Fig. 28 Diagrama de bloques en Simulink

Para comprobar los resultados mencionados en el capítulo 4.2 se comparan las respuestas a la entrada en escalón para ambos valores de C del filtro LCL. En primer lugar, se muestran los resultados para $20 \mu\text{F}$ y 40Ω .

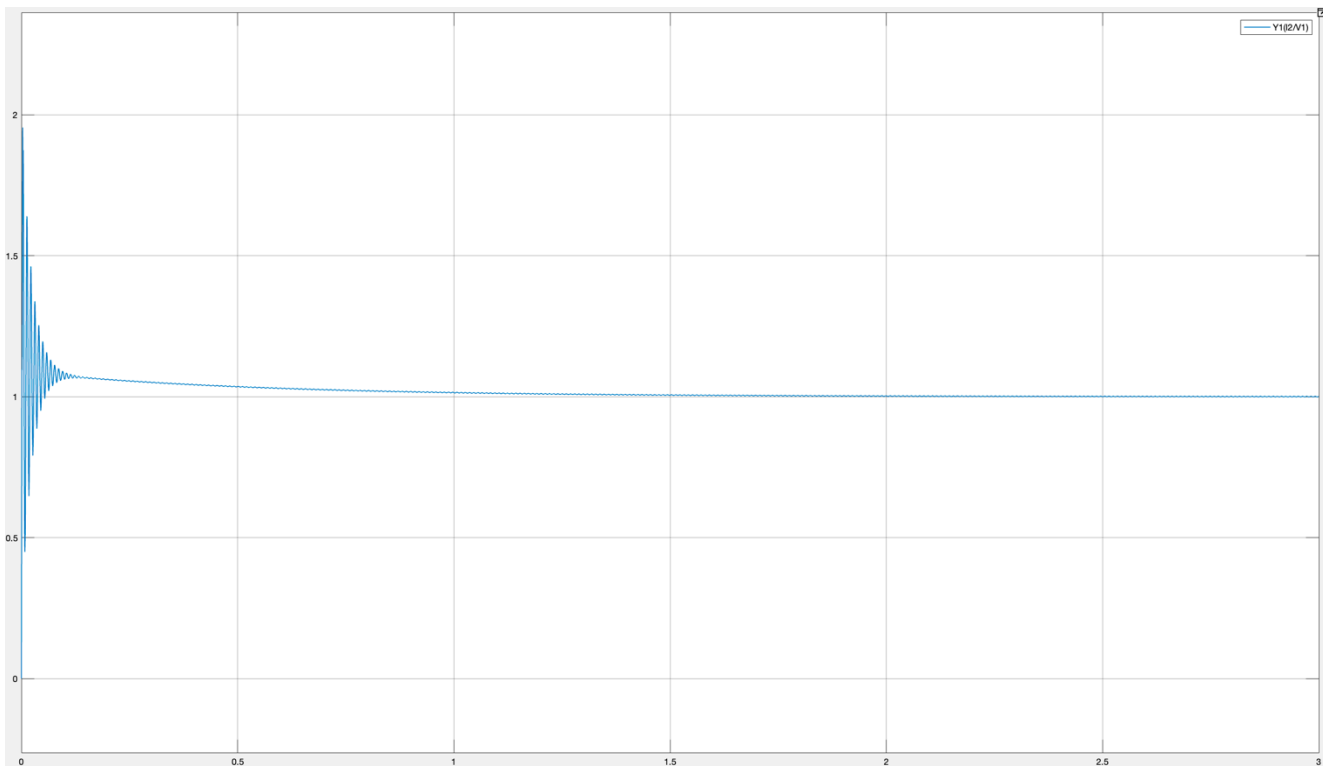


Fig. 29 Respuesta en Simulink para $20 \mu\text{F}$

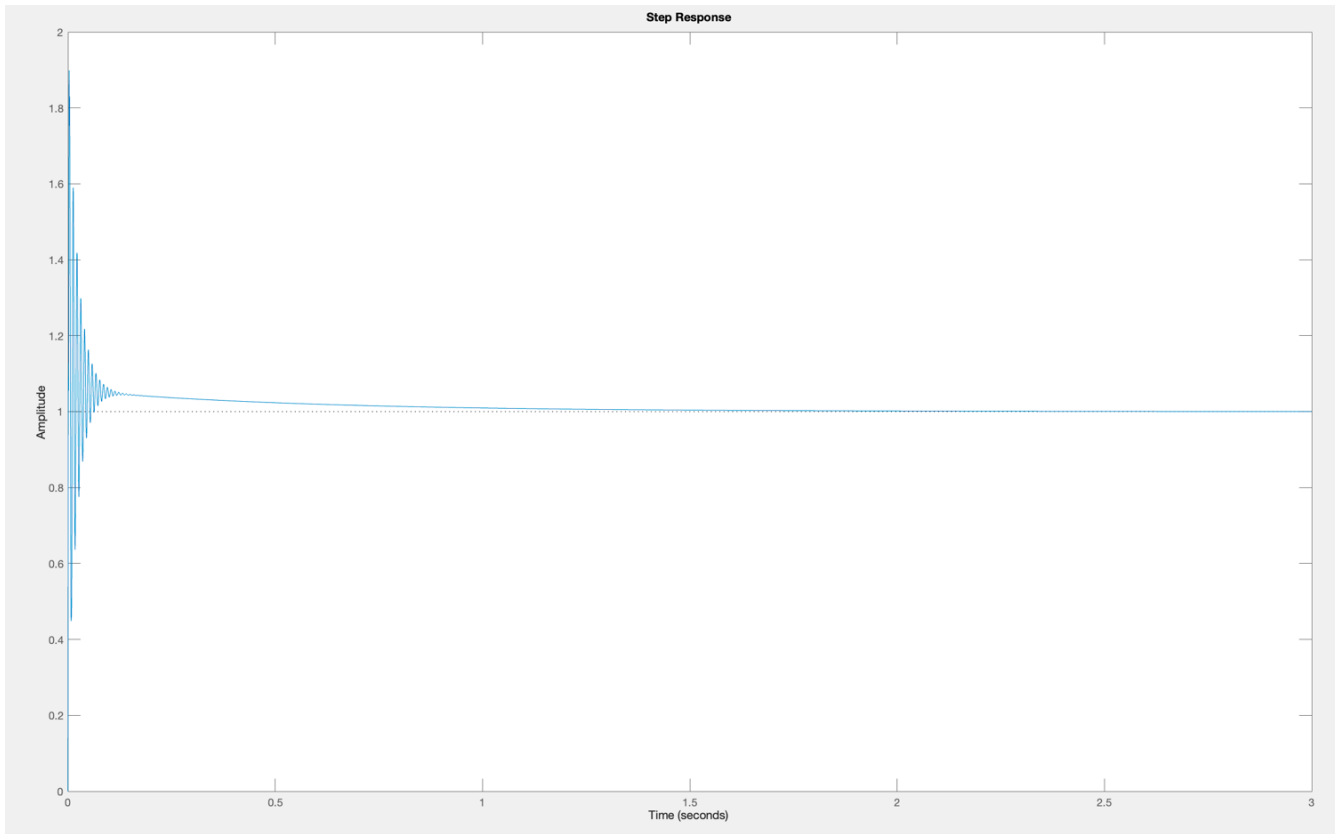


Fig. 31 Respuesta en Matlab para $20 \mu F$

Para el caso de $2 \mu F$ y 340Ω los resultados son las siguientes:

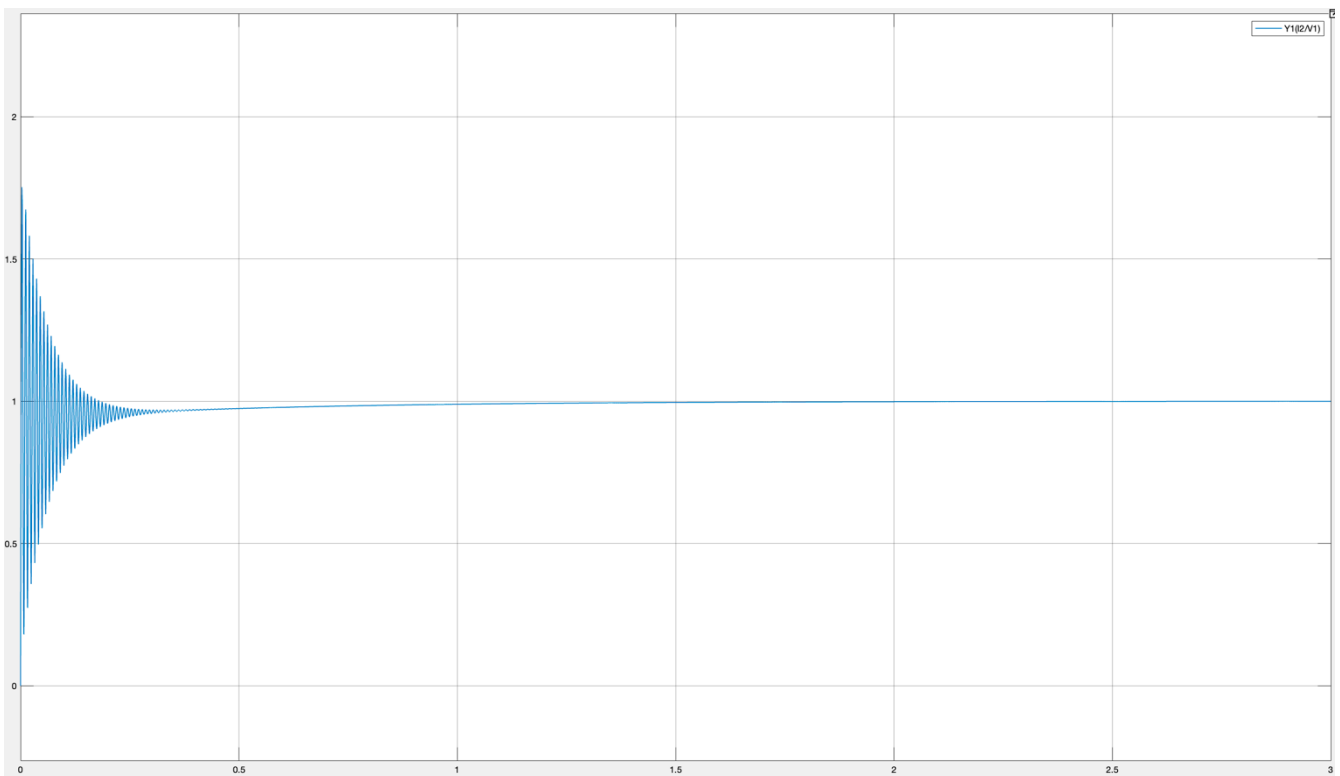


Fig. 30 Respuesta en Simulink para $2 \mu F$

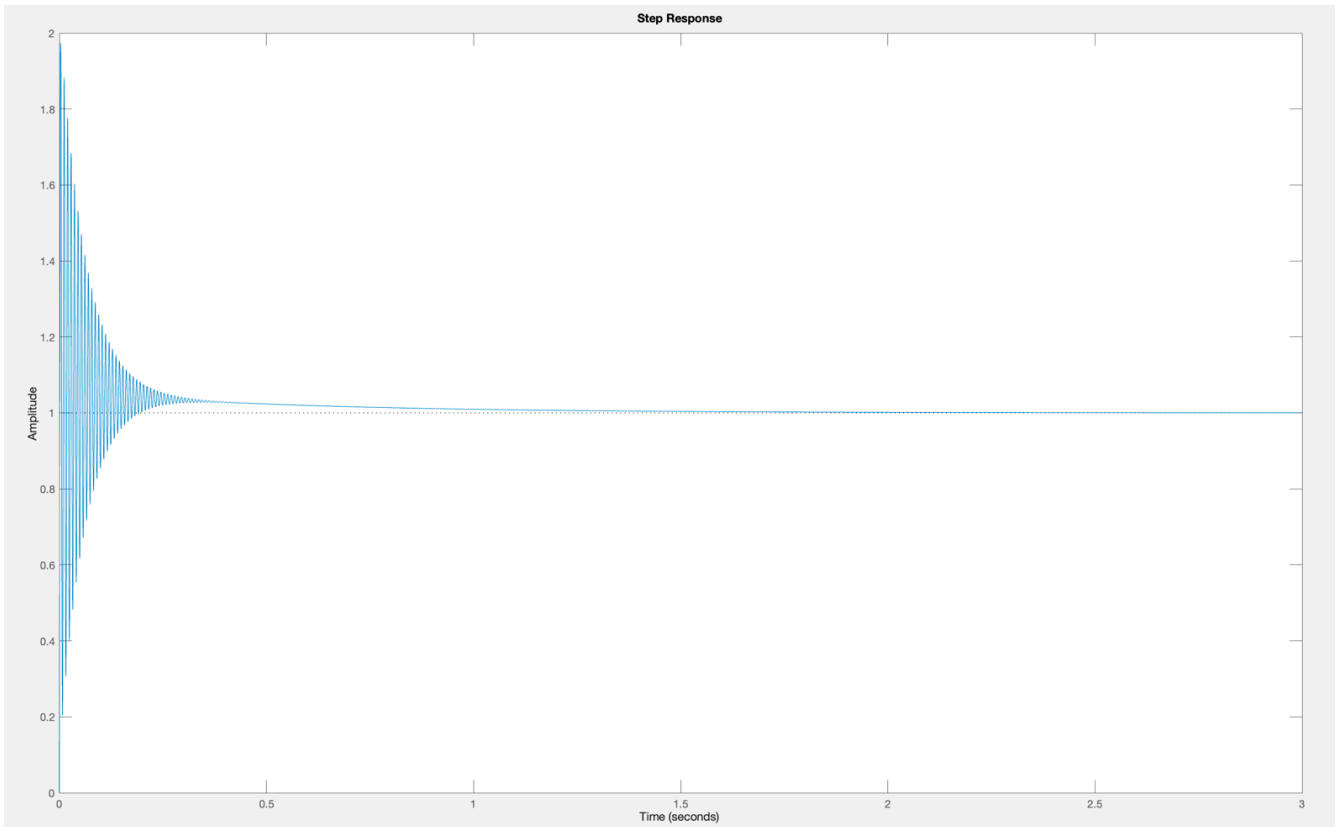


Fig. 32 Respuesta en Matlab para 2 μF

Los resultados obtenidos son casi idénticos en Matlab y en Simulink. Además, esta última representa una herramienta muy importante para futuros estudios, al permitir ensamblar de un modo rápido varios controles de convertidores correspondientes a la paralelización de generadores eólicos, fotovoltaicos y de sistemas de almacenamiento y comprobar cómo afectan en la respuesta del sistema.

4.4 Influencia de la red en la estabilidad

Como se ha comentado previamente, la red a la que se conecta el inversor ensayado en la realidad es una red débil lo cual puede afectar a la estabilidad de los sistemas que se conectan a ella. En este apartado se pretende analizar la estabilidad del modelo planteado eliminando la inductancia del transformador y por tanto disminuyendo la inductancia de la red. Se plantea como en el apartado 4.2 los resultados para los dos valores de la capacitancia: 2 μF y 20 μF .

4.4.1 Filtro con condensador de 2 μF

El lugar de las raíces

El valor de R_3 para el que se obtiene la estabilidad al reducir la inductancia de la red es 0.3Ω , un valor mucho más reducido que en el caso anterior.

La dinámica global del sistema muestra la aparición de tres asíntotas, de las cuales dos de ellas tienden al infinito en el semiplano derecho y una en el semiplano izquierdo. Este polo que se desplazaría hacia el semiplano izquierdo si apareciera una ganancia de 143 o inferior a 0.07, se comporta estable debido a la ganancia unitaria de nuestro sistema.

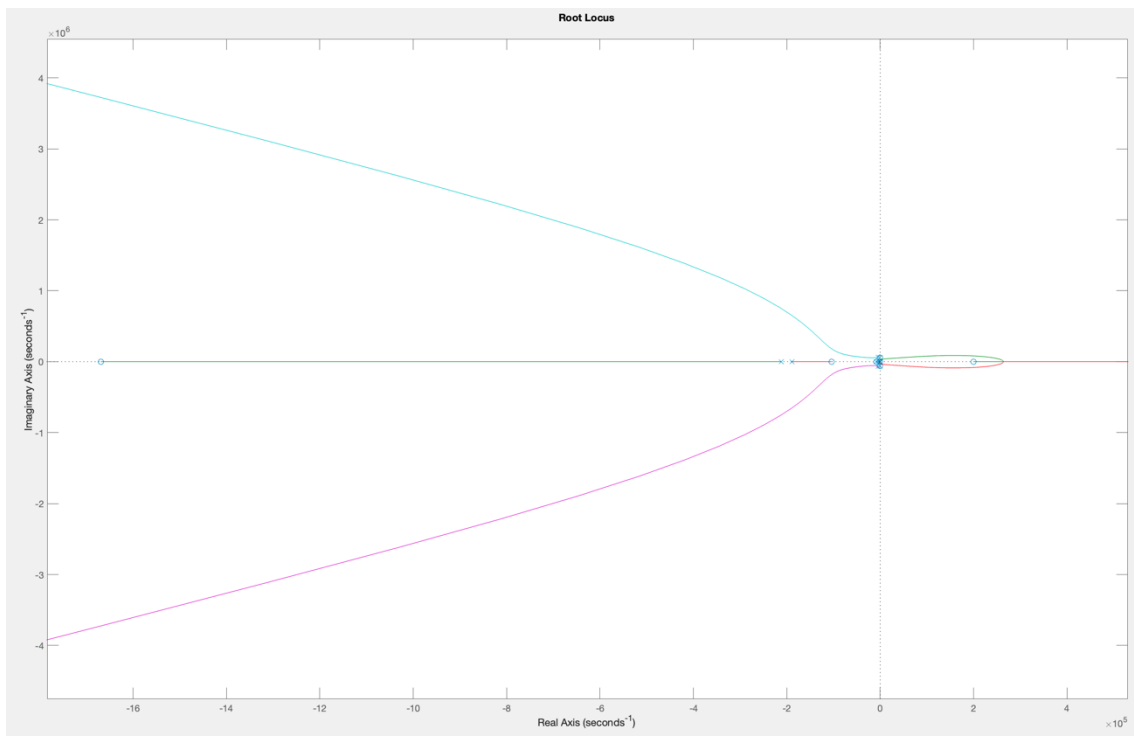


Fig. 33 Lugar de las raíces de la función de bucle abierto FBA

En cuanto a la dinámica más dominante (más cerca del límite de la estabilidad), los polos se mantienen en el semiplano izquierdo para valores de ganancia inferiores 13. Por otro lado, los polos complejos conjugados, en amarillo y negro en la Fig. 34 aportan sobre oscilación a la respuesta que tendrá el sistema ante alguna perturbación. Finalmente, se puede concluir a partir de analizar mediante el lugar de las raíces la función de bucle

abierto FBA del modelo, que el sistema en bucle cerrado será marginalmente estable, ya que obteniendo los polos de la función en bucle cerrado aparece un polo en el origen. Los demás, se quedan en el semiplano izquierdo y son estables. Los polos complejos conjugados afectan a la sobre oscilación de la respuesta mientras que el polo en el origen hace que el sistema sea más sensible a perturbaciones externas o afecta a la estabilidad transitoria.

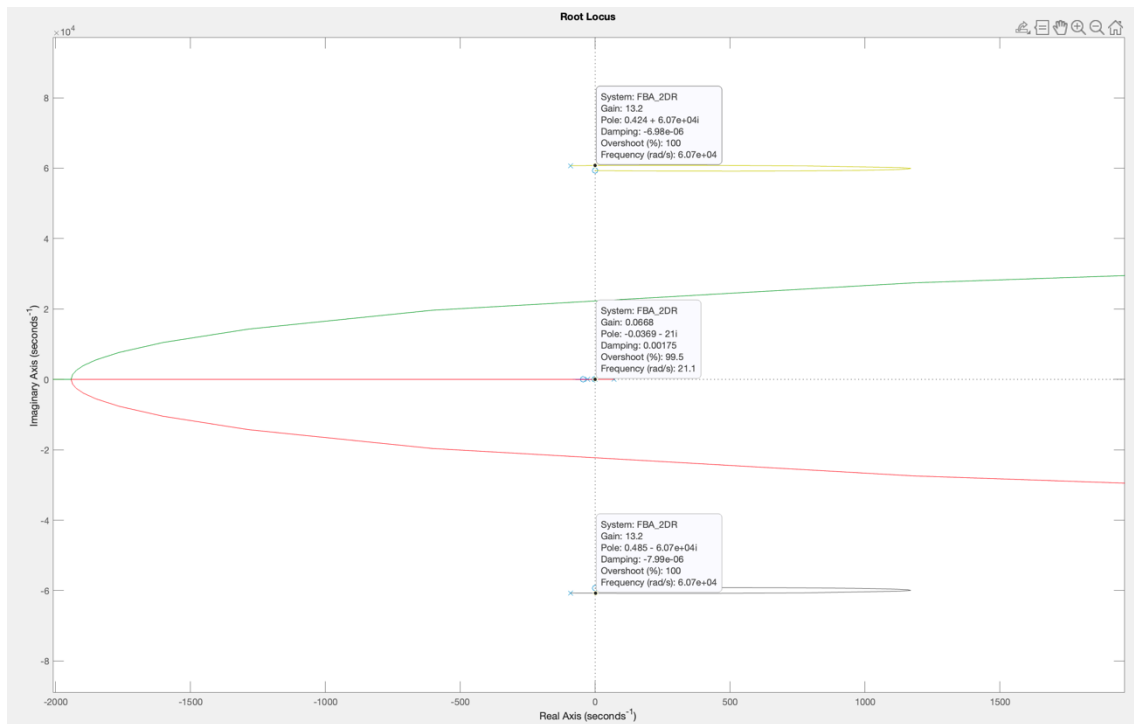


Fig. 34 Lugar de las raíces, dinámica dominante

Nyquist

Aplicando el criterio de estabilidad de Nyquist a la función de bucle abierto, también se concluye en que el modelo es estable. Ya que de la ecuación (17), Z es 0, siendo P el número de polos de la función de bucle abierto en el semiplano derecho y N el número de vueltas del diagrama al punto crítico (-1+0j).

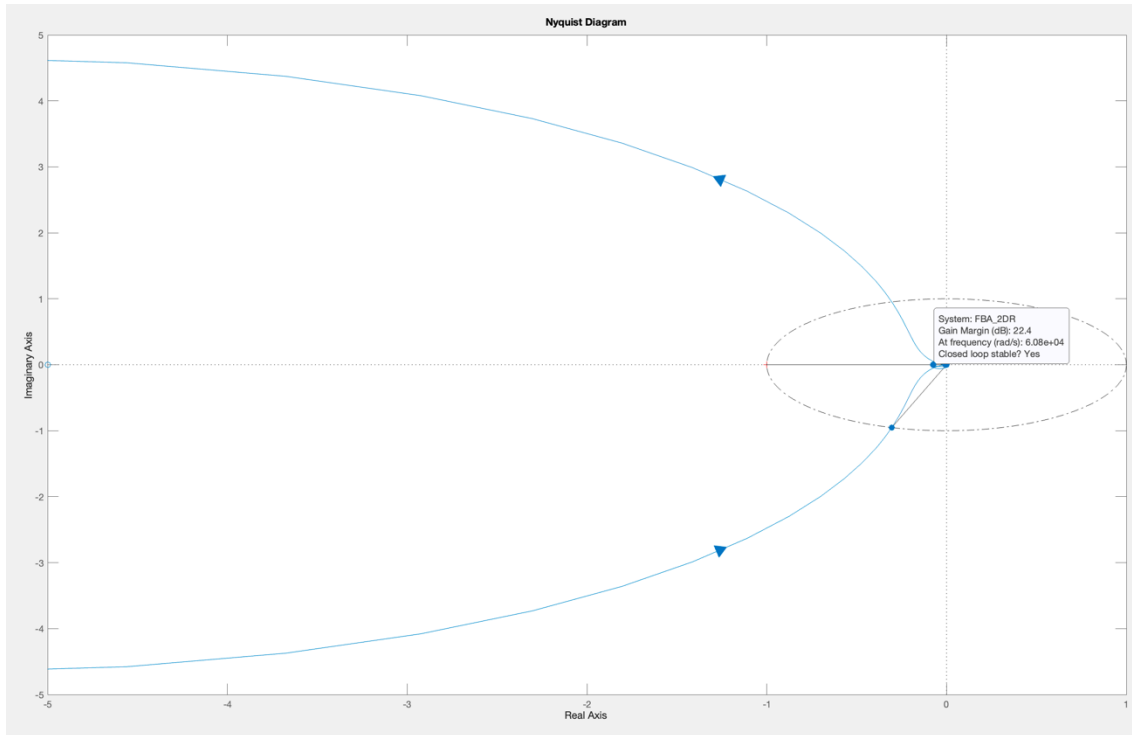


Fig. 35 Diagrama de Nyquist completo

Respuesta a escalón

Finalmente, para verificar la estabilidad del modelo, se aplica una entrada en escalón a la función en bucle cerrado para analizar la respuesta. La función en bucle cerrado representa la relación entre I_2 (Intensidad de conexión a la red) e I_{ref} (intensidad de referencia). La respuesta es la que aparece en Fig. 36 .

En régimen permanente, el sistema alcanza la premisa inicial sin error, pero sí que se observa un pico de sobre oscilación en el estado transitorio alcanzando un pico de 1.1 en un periodo corto de tiempo (Fig. 37), más tarde se suaviza hasta llegar al objetivo. A diferencia del caso con mayor inductancia en la red, el estado transitorio muestra una menor sobre oscilación y un tiempo de respuesta también menor.

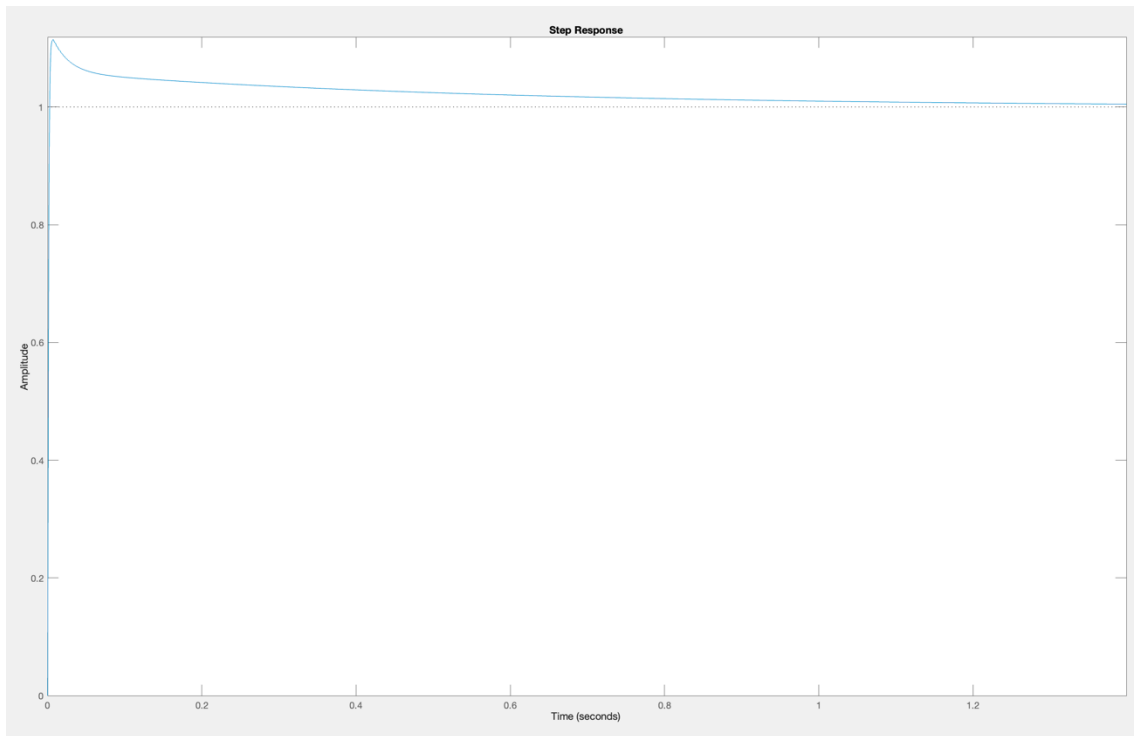


Fig. 36 Respuesta al escalón

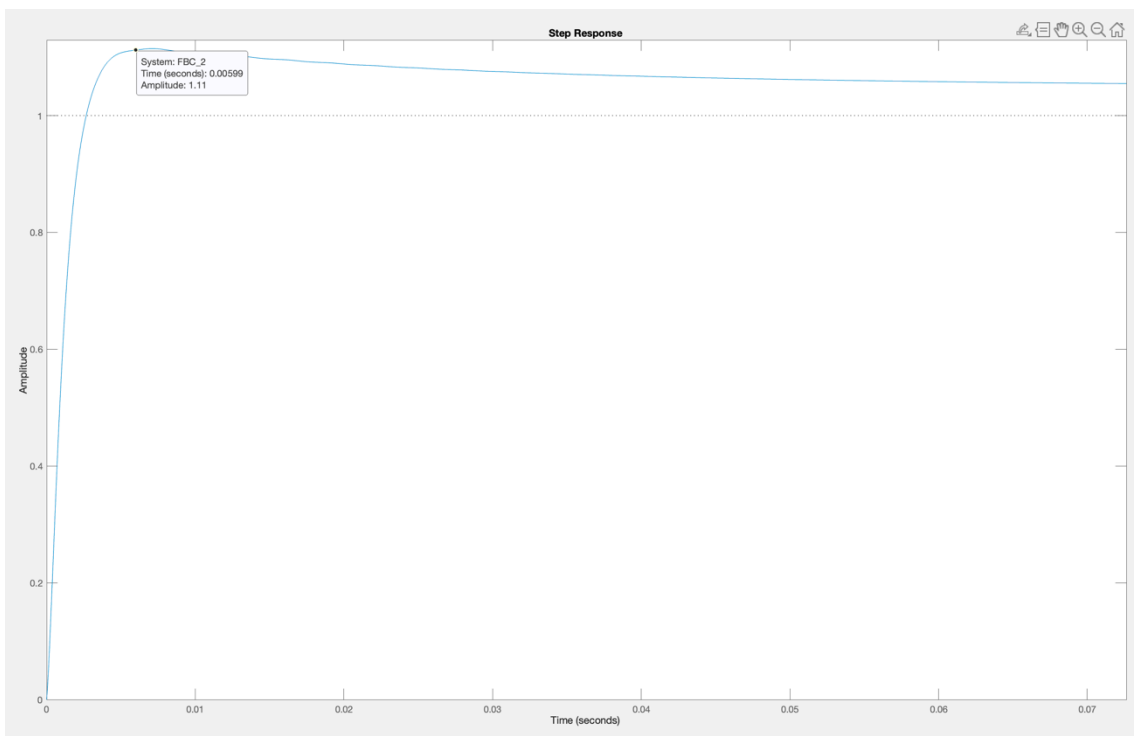


Fig. 37 Respuesta al escalón, régimen transitorio

4.4.2 Filtro con condensador de 20 μF

El lugar de las raíces

Modificando el valor del condensador, el valor de la resistencia para el que el sistema es estable son 0.2Ω y desde el método del lugar de las raíces se obtienen los siguientes resultados:

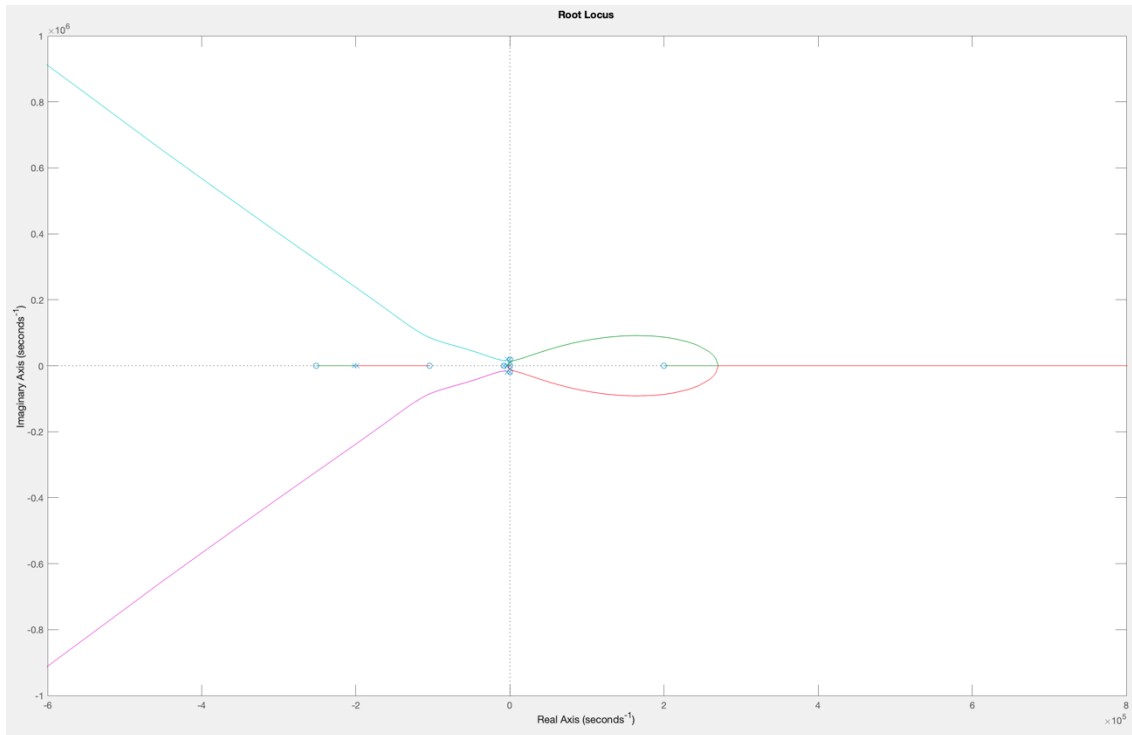


Fig. 38 Lugar de las raíces, dinámica completa

Como en el apartado 4.4.1, el lugar de las raíces muestra tres asíntotas, dos en el semiplano izquierdo y una en el derecho, donde al introducir una ganancia elevada se desplazarán los polos. Aparecen, polos complejos conjugados que en función de su factor de amortiguamiento pueden presentar sobre oscilaciones. En este caso concreto, para valores de ganancia inferiores a 1.76 y superiores a 0.067 el resto de los polos se sitúan sobre el semiplano izquierdo menos uno que se encuentra en el origen y por tanto se determina que el sistema es marginalmente estable.

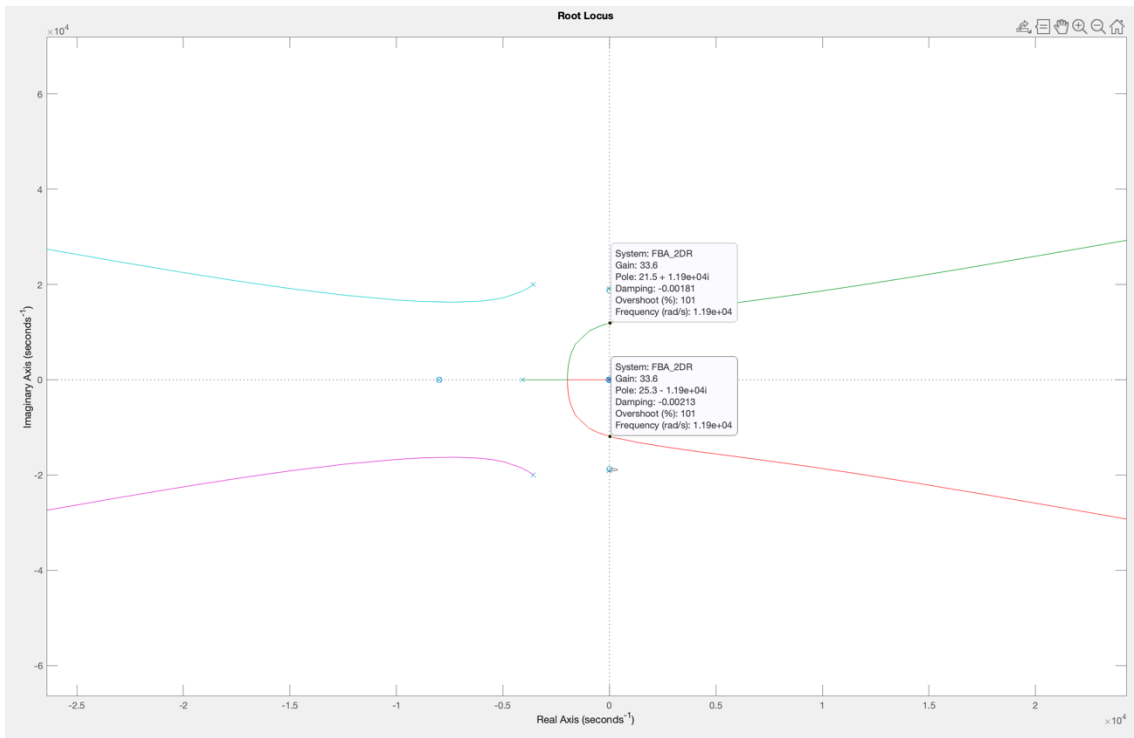


Fig. 39 Lugar de las raíces, dinámica dominante

Nyquist

Con el criterio de estabilidad de Nyquist, se corrobora que el sistema estable obteniendo $Z = 0$ de la ecuación (17), además la confirmación de Matlab, que saca los márgenes de

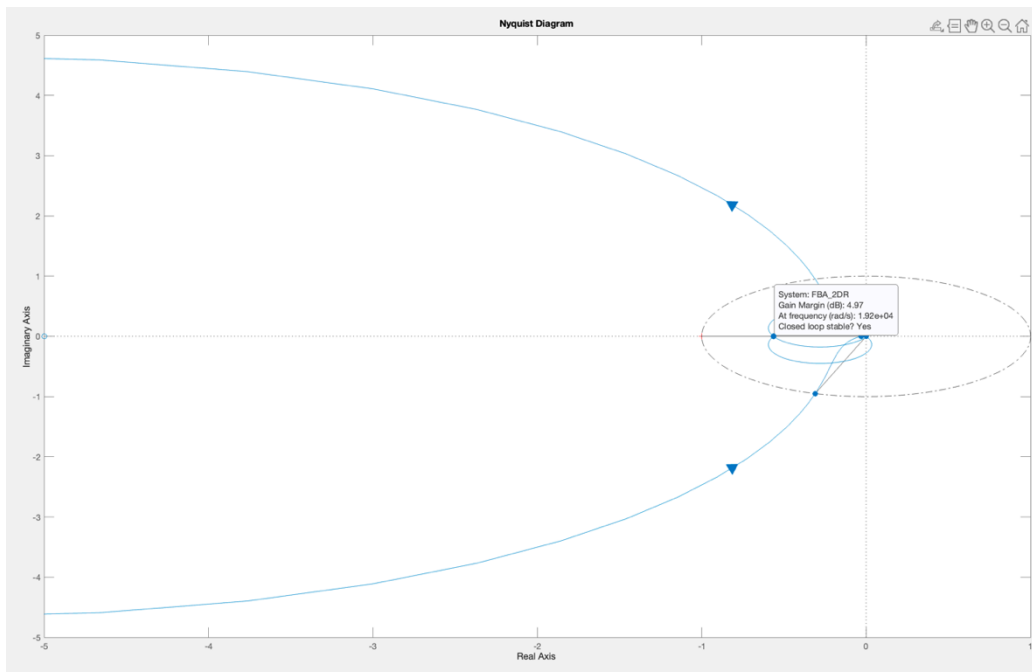


Fig. 40 Diagrama de Nyquist completo

fase y de ganancia y responde a la pregunta de si el sistema se comporta de forma estable en bucle cerrado.

Respuesta al escalón

Tras aplicar una señal en escalón, el sistema alcanza el valor deseado en régimen permanente, pero en el estado transitorio sufre unas pequeñas oscilaciones que en el apartado 4.4.1 no aparecían. Se observa la sobre oscilación antes de entorno a 1.2, que puede ser producida por los polos complejos conjugados antes comentados.

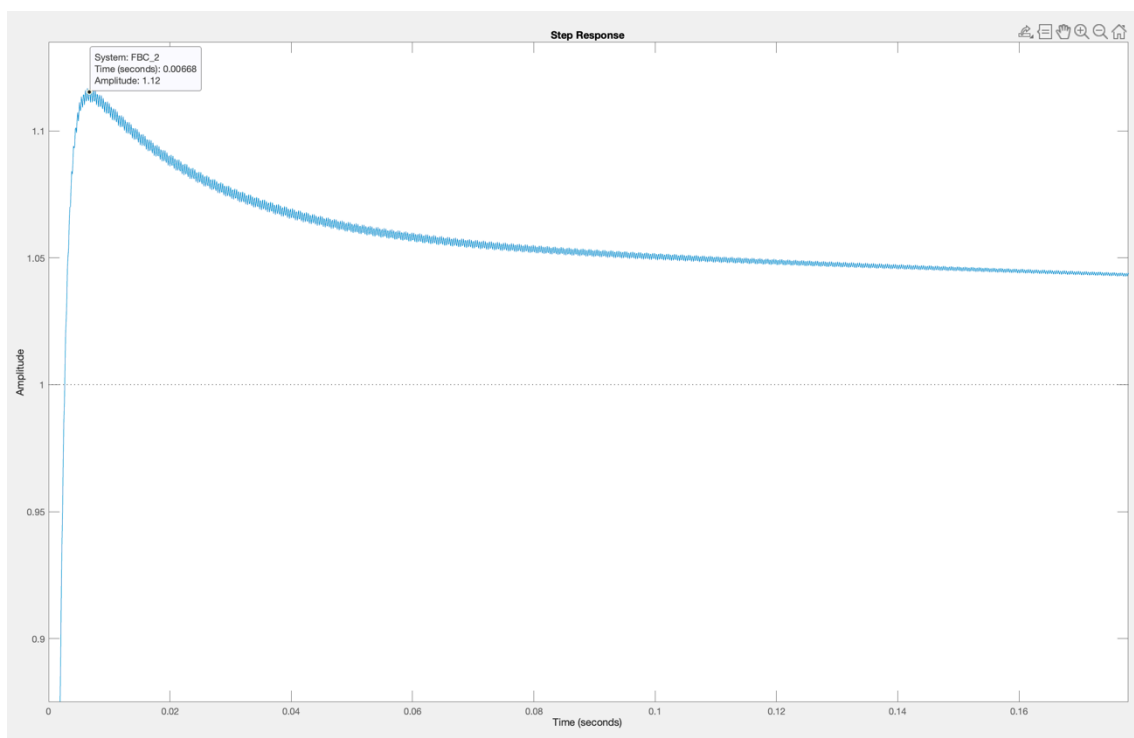


Fig. 41 Respuesta al escalón con sobre oscilación

4.5 Comparación de resultados

Tras analizar la influencia de la inductancia de la red en la estabilidad del sistema, se han encontrado una serie de diferencias entre ambos casos. En la Tabla 5 se muestran los valores de la resistencia de amortiguamiento para los que se ha obtenido un sistema estable en los casos con y sin inductancia del transformador.

Tabla 5 Valores de la resistencia de amortiguamiento

C	R_3 Con Inductancia	R_3 Sin Inductancia
2 μF	315 Ω	0.3 Ω
20 μF	32 Ω	0.2 Ω

Una primera diferencia clara, es el valor de resistencia de amortiguación límite para el que se obtiene la estabilidad del sistema. Para 2 μF cuando se tiene en cuenta la inductancia del transformador, el valor de la resistencia es muy elevado. Por otro lado, para 20 μF , se reduce considerablemente, pero continúa siendo alto. Sin embargo, cuando se varía la red eliminando el transformador (disminuyendo algo la inductancia de la red) ambos valores de resistencia disminuyen y se asemejan. Se observa claramente la influencia de la red en los resultados. Cuanto más débil es la red, más probable es que los sistemas se puedan comportar de forma inestable.

Los resultados muestran que la estabilidad del modelo se obtiene para una resistencia de 315 Ω y 32 Ω , para valores de capacitancia de 2 μF y 20 μF respectivamente. Sin embargo, estos valores difieren de los valores medidos en el inversor SiC, que para 2 μF es capaz de funcionar incluso sin resistencia de amortiguamiento [5]. Una hipótesis de este resultado es la necesidad de considerar el verdadero espectro de frecuencia (ver Fig. 43 y Fig. 42) de las señales generadas por el inversor, en las cuales se observa a partir del armónico 50 hasta valores de 20 kHz próximos a la frecuencia de conmutación (25 kHz) que no hay contenido armónico. En cambio, en la tecnología de Si (frecuencia de conmutación entre 2 y 5 kHz) ambos espectros el de baja frecuencia (hasta armónico 50) y el de conmutación se solapan. Las consideraciones aplicadas en el presente trabajo, basadas en la literatura, han sido aplicadas con éxito en los estudios de estabilidad de inversores de Si, sin embargo, en el caso de la tecnología del SiC se encuentra que no consigue explicar con precisión suficiente lo que se observa experimentalmente.

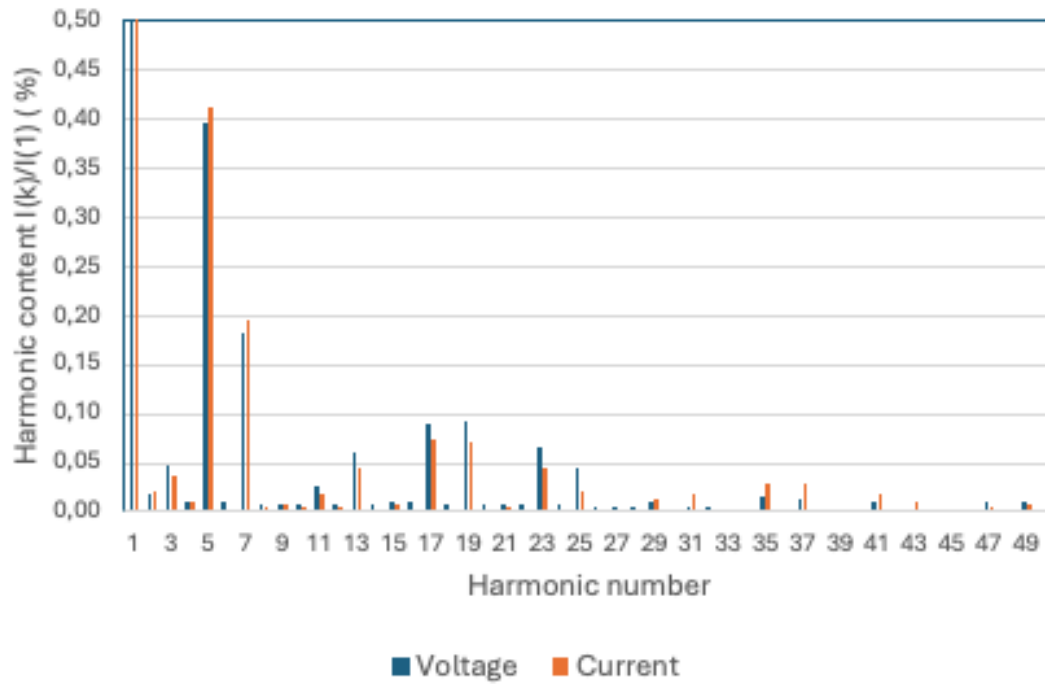


Fig. 43 Contenido de armónicos de corriente hasta el orden 50 en el inversor SiC

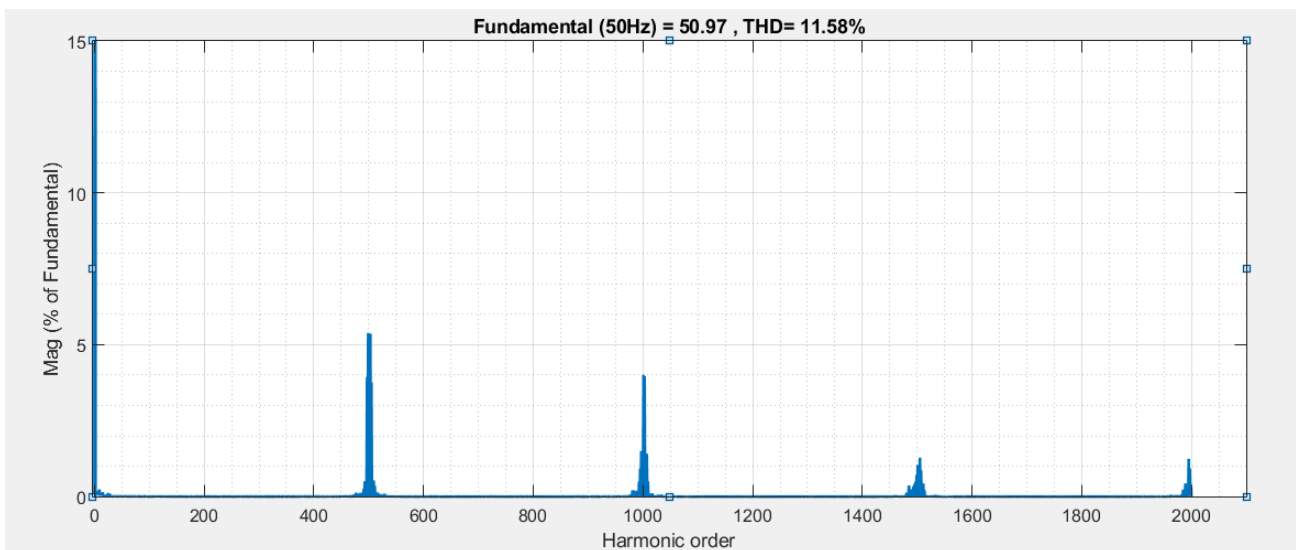


Fig. 42 Contenido de armónicos de corriente de alta frecuencia en el inversor SiC

Para comprobar la discusión, se prueba el modelo desarrollado para los valores de la tabla que corresponden un filtro LCL de un inversor de Si también de 20 kW, aunque se probó experimentalmente a 6 kW en laboratorio de fabricante con $R_{red}=0.016e-3$; y $L_{red}=0.1e-3$. Con resistencia de amortiguamiento de 1.52Ω se encuentra que predice que el sistema es estable como corroboran las pruebas experimentales.

Tabla 6 Valores medidos del filtro LCL para el inversor de tecnología Si

Parámetro	VALOR	Descripción
L_1	2,32 mH	Medida del valor de las inductancias del lado del inversor
	2,54 mH	
	2,33 mH	
R_1	0,327 Ω	Resistencias del lado del inversor
C	6,04 μF	Medida del valor de los condensadores
	5,86 μF	
	6,01 μF	
R_3	1,520 Ω	Resistencias de amortiguamiento
L_2	2,37 mH	Medida del valor de las inductancias del lado de red
	2,25 mH	
	2,36 mH	
R_2	0,323 Ω	Resistencias del lado de red

Capítulo 5. Conclusiones

En este trabajo se ha creado un modelo equivalente de inversor de tecnología SiC desarrollado y ensayado en el propio laboratorio y con un control grid-following, con el fin de que permita agilizar los estudios de estabilidad en su conexión a red teniendo en cuenta la propia red, así como otros generadores que puedan conectarse en el mismo punto de conexión. Este es un proceso complicado debido a la dificultad de trasladar el comportamiento real de un inversor, el filtro de armónicos, etc. a un modelo simulado donde hay aspectos físicos complicados de traspasar. Gracias a este modelo, se puede prever el comportamiento del inversor conectado a la red ante la realización de cualquier cambio. El modelo se ha desarrollado tanto en Matlab como en Simulink, siendo esta última una herramienta muy potente y rápida para obtener resultados. Además, en futuros proyectos permitirá simplificar el estudio de la conexión de varios inversores a la misma red considerando controles diferentes.

Se ha estudiado la estabilidad desde tres criterios diferentes (lugar de las raíces, criterio de estabilidad de Nyquist y la respuesta a un escalón) desde un punto de vista teórico y con el apoyo de Matlab. Se han mostrado los resultados gráfica y numéricamente y se han comparado dos situaciones, donde la diferencia es la utilización de una red débil (laboratorio) o una red más fuerte.

Los resultados muestran que la estabilidad del modelo se obtiene para unos valores de resistencia de amortiguamiento de 315Ω y 32Ω , para valores de capacitancia de $2 \mu\text{F}$ y $20 \mu\text{F}$ respectivamente que difieren de los valores medidos en el inversor real, que incluso para $2 \mu\text{F}$ es capaz de funcionar sin resistencia de amortiguamiento [5]. Una hipótesis de este resultado es la necesidad de considerar el verdadero espectro de frecuencia de las señales generadas por el inversor, lo cual no era necesario en la tecnología de Si (frecuencia de conmutación entre 2 kHz y 5 kHz) y si parece serlo en el caso del SiC cuya frecuencia es mucho más elevada (entre 35 y 60 kHz). Para ello, la introducción de un filtro elimina banda (*band stop*) que eliminara las frecuencias en las

que el inversor no trabaja (entre 4.5 kHz y 15 kHz), ya que en la simulación se considera todo el espectro de frecuencias, es algo que deberá estudiarse en el futuro.

Por otro lado, de los resultados se corrobora la importancia de una red fuerte para sistemas grid-following [17]. Al reducir la inductancia de la red se ha observado una reducción considerable de la resistencia de amortiguamiento, a la vez que una respuesta menos sobre oscilante y más rápida que en el caso de la red de laboratorio.

Capítulo 6. Líneas futuras

Como línea futura de investigación se plantea la mejora del modelo implementado mediante la consideración del espectro real generado por el inversor SiC, lo cual podría plantearse en principio con la introducción de un filtro elimina banda (entorno a la frecuencia de resonancia del sistema 9500 Hz) dado que el inversor no tiene ningún armónico en esa banda. Así, se podrá comprobar su estabilidad y la posibilidad de reducir la resistencia de amortiguamiento.

Por otro lado, se plantea la posibilidad de utilizar este modelo para predecir el comportamiento de varios inversores conectados a la red con igual o diferente tecnología. Así, se podrá determinar la estabilidad ante cambios en la red (una situación que se puede dar en la vida real) y predecir el comportamiento ante esas situaciones de los inversores conectados.

Bibliografía

- [1] Unfccc. (2015). *Paris Agreement Spanish*.
- [2] wwwreees. (2023a). *Informe del Sistema Eléctrico 2023*.
- [3] wwwreees. (2023b). *Informe del Sistema Eléctrico: Informe resumen de energías renovables 2023*.
- [4] Kroposki, B. (2017). Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(6), 831-837. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0339-3>
- [5] Susana Martin Arroyo. (2023). *Plantas eléctricas aisladas: Control y filtrado de armónicos*. EINA.
- [6] García Gracia, M. (s. f.). *Curso de Integración a red. Unidad 8: Estabilidad en sistemas de potencia*.
- [7] Barrero-González, F., Milanés-Montero, M. I., González-Romera, E., Roncero-Clemente, C., & González-Castrillo, P. (2015). Load-frequency control of multiarea electric power systems. Review and new challenges. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 12(4), 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.07.001>
- [8] D. Trebolle Trebolle, P. Frías Marín, J.M. Mazas Ortega and J.L. Martínez Ramos. *El control de la tensión en redes de distribución con Generación Distribuida (1)* [En línea]. Artículo revista. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 2012. [Consulta: 17 de Noviembre de 2024]. Disponible en: https://revista-anales.icaei.es/web/n_13/seccion_3.html
- [9] Unión Europea. (2016). Reglamento (UE) 2016/631 de la Comisión, de 14 de abril de 2016, que establece un código de red sobre los requisitos de conexión de generadores a la red. Referencia: DOUE-L-2016-80721). *Diario Oficial de la Unión Europea* [En línea]

[Consulta: 17 de Noviembre de 2024] <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2016-80721>

[10] PO 13.3, de 1 de marzo, Instalaciones de la Red de Transporte: Criterios de diseño, requisitos mínimos y comprobación del equipamiento y puesta en servicio. Jefatura del Estado, BOE núm. 51, de 1 de marzo de 2005. [en línea] [consulta: 20 de noviembre de 2024].

[11] Universitat de Valencia. (s.f). Convertidores CC-CA: inversores de onda cuadrada. <https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/INVERSORES%20SQW.pdf>

[12] García Aznar, E., & García Gracia, M. (2020). *Trabajo Fin de Máster ESTUDIO DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO, VALIDACIÓN DE SU MODELO Y ANÁLISIS DE CONEXIÓN A RED STUDY OF A PHOTOVOLTAIC INVERTER, VALIDATION OF ITS MODEL AND ANALYSIS OF GRID CONNECTION. Autor/es.*

[13] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (s. f.). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño.*

[14] R. Mechouma, B. Azoui and M. Chaabane, "Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review," *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, Nabeul, Tunisia, 2012, pp. 37-42, doi: 10.1109/REVELT.2012.6195245.

[15] Universitat de Valencia. (s.f). Convertidores CC-CA: inversores de onda cuadrada. <https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/INVERSORES%20SQW.pdf>

[16] L., & Díaz González, J. (1999). *Lección de oposición. Inversores PWM.* <http://ieeepels-ies.es/Pels/Pdf/Leccion%20Inversores%20Juan%20Diaz.pdf>

[17] Aljarrah, R., Fawaz, B. B., Salem, Q., Karimi, M., Marzooghi, H., & Azizipanah-Abarghooee, R. (2024). Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review. *IEEE Access*, 12, 5534-5561. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3349630>

- [18] Lasseter, R. H., Chen, Z., & Pattabiraman, D. (2020). Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2), 925-935. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2959271>
- [19] David, A., López, C., Miguel, D., & Gracia, G. (s. f.). *Trabajo Fin de Máster Diseño del control de inversores grid-forming para microrredes aisladas e implementación en FPGA mediante técnicas de prototipado rápido*.
- [20] Agorreta, J. L., Borrega, M., López, J., & Marroyo, L. (2011). Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 770-785. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2095429>
- [21] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (M. Martín-Romo & E. Martín, Eds.; 5ª Edición). Pearson Educación, S.A.
- [22] MathWorks. (n.d.). *Uso de FEEDBACK para cerrar lazos de feedback*. <https://es.mathworks.com/help/control/ug/using-feedback-to-close-feedback-loops.html>

Anexo A

Criterio Estabilidad Nyquist

Como forma de aceptación del criterio de estabilidad de Nyquist se escoge un ejemplo obtenido de [21] para un caso similar al estudiado. El ejemplo es el 7.18 del capítulo 7.6.

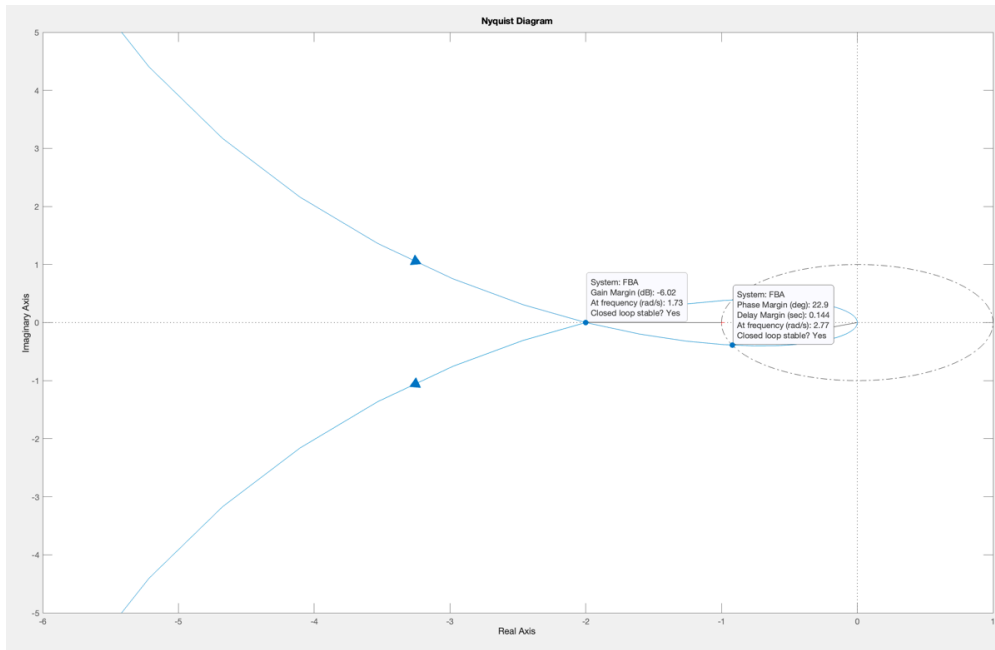
Se pide investigar la estabilidad de un sistema en lazo cerrado con la siguiente función de transferencia:

$$G(s).H(s) = \frac{K \cdot (s + 3)}{s \cdot (s - 1)}$$

Para valor de k mayores que 1. Para la función en bucle abierto se observa que tiene un polo en el origen y otro polo en s=1. Al encontrarse un polo en el semiplano derecho, la función en bucle abierto se considera inestable. Para el ejemplo se escoge el caso de K = 2. La función de transferencia es:

$$G(s).H(s) = \frac{(2s + 6)}{s \cdot (s - 1)}$$

El diagrama de Nyquist obtenido mediante Matlab:



Aplicando el criterio de estabilidad de Nyquist:

$$Z = N + P = -1 + 1 = 0$$

El sistema en bucle cerrado es estable ya que en el diagrama se ve como da una vuelta en sentido contrario a las agujas del reloj que equivale a $N = -1$, como se indica en el capítulo 7.6 de [21].

En el ejemplo del libro, se realiza el estudio con el diagrama polar, pero aquí se usa el diagrama de Nyquist realizado con Matlab porque es un método más preciso y engloba el rango de frecuencias entre menos infinito e infinito.

Anexo B.

Datos y función de transferencia del filtro

En este apartado se introducen los datos y las funciones de transferencia que se utilizan para construir el modelo. La función de transferencia del filtro se obtiene de [5]:

`%Se introducen los datos`

```
Rred=0.0507; %Impedancia de la red
Lred=1.14e-03; %Inductancia de la red
R3=32; %Resistencia de amortiguamiento
C=20e-06; %Capacitancia
L1=0.142e-3; %Inductancia del lado del inversor
L2=1e-3; %Inductancia del lado de la red
R1=0; %Resistencia interna de L1
R2=0.0000035; %resistencia interna de L2
```

```
Kp=0.9;
Ki=1.52;
Ts = 1/(100000); %tiempo de muestreo
```

```
Lred=Lred+ 1e-03; %Sumando la inductancia del trafo
```

`%Función de transferencia del filtro`

```
s=tf('s');
N0=Rred;
N1=( (R3*Rred*C) + (Lred) );
N2=(R3*Lred*C);
N=N0+N1*s+N2*s^2;
a1=(R3+R1)*C;
a2=L1*C;
%NiU
NiU_s = (a1*N0) + N1;
NiU_s2 = (a2*N0) + N2;
NiU_s3 = (a1*N2) + (a2*N1);
NiU_s4 = (a2*N2);
NiU = N0 + NiU_s*s + NiU_s2*s^2 + NiU_s3*s^3 + NiU_s4*s^4;
```

`% D+A`

```
coef_s=( (Rred*R1)*C )+( R3*Rred*C )+( Lred ) + (R1*R3*C) + L1 + ( (
(R1*R2)+(R2*R3) ) * C ) + L2;
coef_s2= ( ( (Rred*L1) + (R1*Lred) ) *C ) + ( (L1+Lred)*R3*C ) + ( (
(R1*L2) + (R2*L1) + (R3*L2) ) * C ) ;
```

```

coef_s3=(L1*Lred*C) + (L1*L2*C);
cte=Rred+R1+R2;
% *
ZZ_o = R1+R2;
ZZ_s=(R1*R2*C) + (R1*R2*C) + L1 + (R3*R2*C) + L2;
ZZ_s2=( (R1*L2) + (R2*L1) + (R3*L1) + (R3*L2) ) * C;
ZZ_s3= L1*L2*C;

DAZ_o= cte*ZZ_o;
DAZ_s= (cte*ZZ_s) + (coef_s*ZZ_o);
DAZ_s2=(cte*ZZ_s2) + (coef_s*ZZ_s) + (coef_s2*ZZ_o);
DAZ_s3=(cte*ZZ_s3) + (coef_s*ZZ_s2) + (coef_s2*ZZ_s) + (coef_s3*ZZ_o);
DAZ_s4= (coef_s*ZZ_s3) + (coef_s2*ZZ_s2) + (coef_s3*ZZ_s);
DAZ_s5= (coef_s2*ZZ_s3) + (coef_s3*ZZ_s2);
DAZ_s6= (coef_s3*ZZ_s3);
DAZ = DAZ_o + DAZ_s*s + DAZ_s2*s^2 + DAZ_s3*s^3 + DAZ_s4*s^4 +
DAZ_s5*s^5+ DAZ_s6*s^6;

G_i_v= (NiU/DAZ);
figure('Name', '-i2/v1');
h=bodeplot(G_i_v); %representa el bode normal

%Se introduce Zred (IMPEDANCIA DE RED)

Num_Zred = [Lred Rred];
Den_Zred = [1];
Zred = tf(Num_Zred,Den_Zred);

%Se introduce el Pi PI (PI = Kp + Ki/s)

Pi_1 = Kp + (Ki/s);

%Se introduce el retraso del controlador

Num_Pade = [-0.5*Ts 1];
Den_Pade = [0.5^2*Ts^2 Ts 1];
Ds_Pade = tf(Num_Pade,Den_Pade);

%Se introducen los filtros (en este caso se usan dos filtros EMA)

Omega_fc=2*pi*1326.154;
alfa= Ts/((1/Omega_fc)+Ts) ;

num=[alfa 0];
den= [1 (alfa-1)];
H=tf(num,den,Ts);
H_s=d2c(H);

Fv = H_s; %Filtro EMA para la tensión realimentada con la impedancia
de red
Fi= H_s; %Filtro EMA para la intensidad de salida

```

Anexo C.

Estudio de estabilidad

En este apartado, se muestra el código de Matlab por el que se obtienen los resultados para analizar los criterios de estabilidad antes comentados.

```
%Una vez construidas las funciones de transferencia en el documento  
%`Modelado`, se obtiene la estabilidad
```

```
s = tf('s');
```

```
FBA_1D = Ds_Pade*G_i_v; %cadena directa del primer bucle  
Real_1 = Fv*(Zred); %realimentación del primer bucle  
FBC_1 = feedback(FBA_1D,Real_1,+1);  
FBA_1DR = FBA_1D*Fv*Zred; %función a analizar como bucle abierto.
```

```
%SE CIERRA EL SEGUNDO BUCLE PARA ANALIZAR la estabilidad
```

```
%Se define la cadena directa y la realimentación
```

```
FBA_2D = FBC_1*Pi_1;  
REAL_2 = Fi;
```

```
FBA_2DR = FBA_2D*Fi; %Función en bucle abierto de todo el modelo
```

```
%Se cierra el bucle
```

```
FBC_2 = feedback(FBA_2D,REAL_2);
```

```
figure('Name','Función bucle abierto total')  
rlocus(FBA_2DR);  
[p,z] = pzmap(FBC_2)
```

```
figure('Name','Escalón total')  
step(FBC_2,10);
```

```
figure('Name','Nyquist FBA total')  
nyquist(FBA_2DR)
```