

Ingeteam

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**HERRAMIENTA DE SINTONIZACIÓN
AVANZADA DE LAZOS DE CONTROL**



Raquel Villegas Baztán

Tutor Ingeteam: Dr. Xabier Juancorena Saldías

Tutor UPNA: Dr. Eugenio Gubía Villabona

Pamplona, 24 de Junio de 2016

ABSTRACT

Wind turbines are often connected to complex grids and it is really common that stability problems arise when connecting power electronic converters to them. Therefore, it is truly important to make a good characterization of the electric system and to choose, in an appropriate way, controller parameters, taking into account the whole frequency range.

The main purpose of this work is to obtain a tool which calculates optimal values of controller parameters. These parameters are used at the current control of the grid side converter of a power system based on Full Converter topology. For transfer functions calculation, which is needed for the stability study, it is considered that there might be grid instabilities, so that direct and inverse sequences appear.

Not only parameters of one wind turbine are calculated, but also those ones of some wind turbines connected in parallel, looking at different stability criteria. To carry out this study, it is necessary to consider the normal current that circulates to grid and the differential cross current between wind turbines.

Moreover, a graphic interface, that allows the user to utilize the tool without knowing how it internally works, is designed.

Key words: Stability, Grid Side Control, Controller Parameters, Parallel Wind Turbines, Grid Filter

RESUMEN

Las redes a las que se conectan los aerogeneradores son muy complejas y es común que aparezcan problemas de estabilidad al conectar a ellas los convertidores electrónicos de potencia. Por ello, es importante caracterizar bien un sistema y escoger los parámetros de los controladores de forma adecuada, teniendo en cuenta todo el rango de frecuencias.

El principal objetivo de este trabajo es disponer de una herramienta que calcule los valores óptimos de los parámetros de los reguladores PI usados en el control de corriente del convertidor del lado red de un sistema de potencia Full Converter. Para el cálculo de las funciones de transferencia, las cuales son necesarias para el estudio de estabilidad, se considera que puede haber desequilibrios en la red, de forma que se tiene tanto secuencia directa como inversa.

No sólo se calculan los parámetros para una turbina, sino que se obtienen los valores para varias turbinas conectadas en paralelo a la red, atendiendo a los diferentes criterios de estabilidad. Para el estudio es necesario tener en cuenta tanto la corriente normal que circula a red como la corriente cruzada diferencial entre turbinas.

Se diseña, además, una interfaz gráfica que permita al usuario utilizar la herramienta sin necesidad de conocer cómo funciona ésta internamente.

Palabras clave: Estabilidad, Control del Lado Red, Parámetros del Controlador, Turbinas en Paralelo, Filtro de red.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.2 OBJETIVOS.....	10
2. MARCO TEÓRICO PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD.....	12
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	12
2.1.1 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA FC.....	12
2.1.2 LAZOS DE CONTROL.....	14
2.1.2.1 Ejes rotatorios dq.....	15
2.1.2.2 Lazo de corriente.....	17
2.1.2.3 Lazo de tensión	18
2.1.2.4 Control dual de corrientes.....	19
2.2 MODELADO DEL SISTEMA COMPLETO.....	21
2.2.1 MODELADO DEL SISTEMA EN EJES DQ.....	22
2.2.2 MODELADO DEL SISTEMA EN EJES ALPHA-BETA	23
2.2.3 CONCLUSIÓN.....	25
2.3 PUNTO DE PARTIDA: FUNCIÓN DE CÁLCULO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN ALPHA-BETA	25
2.4 CRITERIO PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD.....	27
3. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO EN BASE AL MARGEN DE FASE Y LA FRECUENCIA DE CORTE	29
3.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO.....	29
3.1.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS CON SECUENCIA DIRECTA	29
3.1.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS CON SECUENCIA DIRECTA E INVERSA	30
3.1.3 CRITERIO DE SELECCIÓN	31
3.2 PROBLEMA ENCONTRADO-CONCLUSIONES	34
3.2.1 SISTEMAS DE CONTROL CON ELEMENTOS RESONANTES	35
3.2.2 EJEMPLO DEL PROBLEMA Y CONCLUSIÓN.....	37
3.3 VALIDACIÓN DEL PROBLEMA MEDIANTE SIMULACIÓN	39
4. IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO ITERATIVO BASADO EN EL ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE BODE.....	41
4.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO.....	41
4.1.1 BARRIDO DE KP Y TN-DEFINICIÓN DE VECTORES.....	42
4.1.2 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	45
4.1.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y OBTENCIÓN DE VARIABLES	45
4.1.4 CRITERIO DE ESTABILIDAD.....	45
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS.....	46

4.2.1	BARRIDO KP Y TN	46
4.2.2	CASO DE SECUENCIA DIRECTA	50
4.2.3	CASO DE SECUENCIA DIRECTA E INVERSA.....	52
4.3	VALIDACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE SIMULACIÓN.....	53
5.	APLICACIÓN DEL MÉTODO ITERATIVO A VARIAS TURBINAS	55
5.1	MODELOS EQUIVALENTES DEBIDO A LAS DIFERENTES CORRIENTES EXISTENTES.....	55
5.2	CRITERIO DE ESTABILIDAD.....	57
5.3	OPCIONES DE CÁLCULO	57
5.3.1	CÁLCULO DEL NÚMERO DE TURBINAS PARA KP Y TN OBTENIDAS.....	58
5.3.2	CÁLCULO DE KP Y TN PARA CONECTAR N TURBINAS	59
5.3.3	CÁLCULO DEL NÚMERO MÁXIMO DE TURBINAS A CONECTAR	60
6.	INTERFAZ GRÁFICA.....	62
6.1	CARGA DE PARÁMETROS Y CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA 64	
6.2	ELECCIÓN DE UNA DE LAS OPCIONES.....	66
6.2.1	OPCIÓN 1: CÁLCULO DE PARÁMETROS (SECUENCIA DIRECTA).....	67
6.2.2	CÁLCULO DE PARÁMETROS (SECUENCIA DIRECTA E INVERSA).....	69
6.2.3	CÁLCULO DEL NÚMERO DE TURBINAS (SEPARACIÓN DE SECUENCIAS)	70
6.2.4	CÁLCULO DE PARÁMETROS AL CONECTAR N TURBINAS (SEPARACIÓN DE SECUENCIAS)	72
6.2.5	CÁLCULO DEL NÚMERO MÁXIMO DE TURBINAS A CONECTAR	74
7.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	75
7.1	CONCLUSIONES	75
7.2	LÍNEAS FUTURAS	77
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	78
	INDICE DE FIGURAS.....	79

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La reducción y la localización de las fuentes de energía tradicionales y el problema del cambio climático son los principales factores que han llevado a las energías renovables a experimentar un gran crecimiento en estos últimos años. Entre ellas, la más beneficiada ha sido la energía eólica.

La energía eólica instalada en el mundo creció un 44% en 2014, hasta situarse en 369.553 MW, según datos del Global Wind Energy Council [GWEC15]. Actualmente, China, Estados Unidos, Alemania y España son los primeros productores mundiales. El gráfico de potencia acumulada a nivel mundial se observa en la Figura 1:

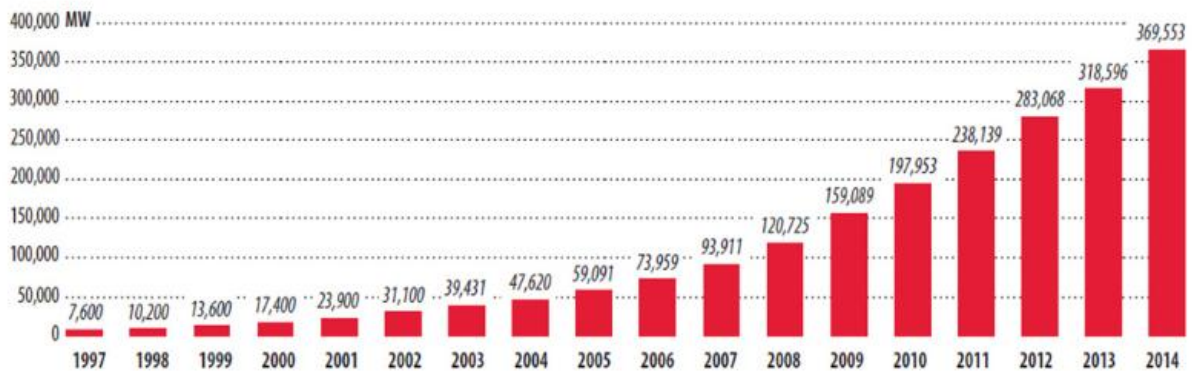


Figura 1. Potencia acumulada mundial de energía eólica

En los principios de la eólica, la mayoría de las máquinas eran aerogeneradores de velocidad fija, es decir, se conectaban directamente a la red. En la actualidad, la mayoría de las turbinas son de velocidad variable. Con ellas, se puede generar potencia en un amplio rango de velocidades, aunque para ello éstas se conectan a la red a través de un stack de potencia, ya sea usando la topología Full Converter (FC) o Double Fed Induction Generator (DFIG), entre otras. Dicho stack de potencia está formado por dos convertidores unidos por el bus de continua: el convertidor del lado red (GSC) y el convertidor del lado máquina (MSC). En la Figura 2 se muestra el caso particular de una topología Full Converter. El control del GSC es el encargado de mantener la tensión del bus de continua constante, así como de controlar la potencia activa y reactiva que se inyecta o se absorbe de la red. Por su parte, el MSC se encarga de regular las corrientes y tensiones del rotor, así como de la potencia generada.

Para conectar el GSC a red se necesita colocar una serie de elementos entre ellos:

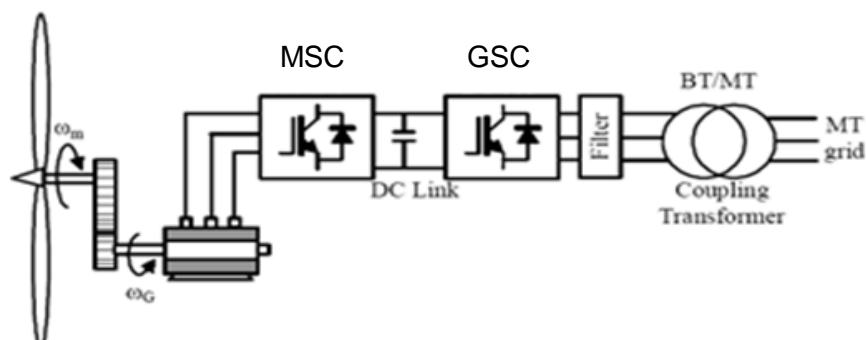


Figura 2. Configuración Full Converter

Tal y como se observa en la Figura 2, los elementos intermedios son el filtro de red, el transformador y la propia impedancia de red. El filtro de red o de armónicos es un elemento imprescindible ya que, por normativa, está limitado el contenido armónico inyectado a red. Este filtro tiene una estructura L-RC-L y consta de dos partes: una primera etapa que incluye las inductancias de salida del convertidor y un banco paralelo de condensadores, y una segunda etapa constituida por la inductancia del transformador y de la red. En función de si el aerogenerador se conecta a una red de mejor o de peor calidad, las frecuencias de resonancia del filtro variarán y, por ello, la estabilidad del sistema se verá afectada.

La complejidad de las redes a las que se conectan los aerogeneradores puede derivar en problemas de estabilidad. Es por ello, que ser capaz de caracterizar el sistema y elegir unos parámetros adecuados para el controlador del GSC se convierte en una tarea primordial para garantizar la estabilidad deseada.

Tradicionalmente, el control de las corrientes inyectadas en la red se realiza con un regulador PI. Los parámetros del PI se ajustan para lograr un ancho de banda de 120-150 Hz. En ese rango de frecuencia la impedancia de red se puede aproximar como una inductancia. Con esa premisa se establece el grado de estabilidad que debe proporcionar el PI. Sin embargo, el filtro de red, junto con el transformador y la inductancia de red, pueden llevar al sistema a la inestabilidad debido a las frecuencias de resonancia del filtro L-RC-L. Experimentalmente se ha visto que ese problema se agrava cuando se conectan varias turbinas a la misma red (parque eólico).

Como consecuencia, se observa la necesidad de disponer de una herramienta de diseño de controladores, basada en un estudio de la estabilidad, que tenga en cuenta todo el rango de frecuencias.

1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo del Trabajo Fin de Máster es crear una herramienta que calcule los valores óptimos de los parámetros de los reguladores PI usados en el control de corriente del GSC de un sistema de conversión de potencia con una topología Full Converter.

Para ello, se parte de una herramienta de análisis de estabilidad proporcionada por Ingeteam Power Technology, que calcula la función de transferencia del conjunto de lado red y la representa en diagramas de Bode. Esta función de transferencia será la que se use para el cálculo de los parámetros de los PI. Además, se va a considerar que no sólo aparece la secuencia directa sino también la secuencia inversa.

Como ya se sabe, el sistema completo consta de un sistema continuo, formado por el sistema físico, un sistema discreto, formado por el control del convertidor y la modulación PWM que se modelará como un retardo y un retenedor. Todo lo anterior se observa en la Figura 3:

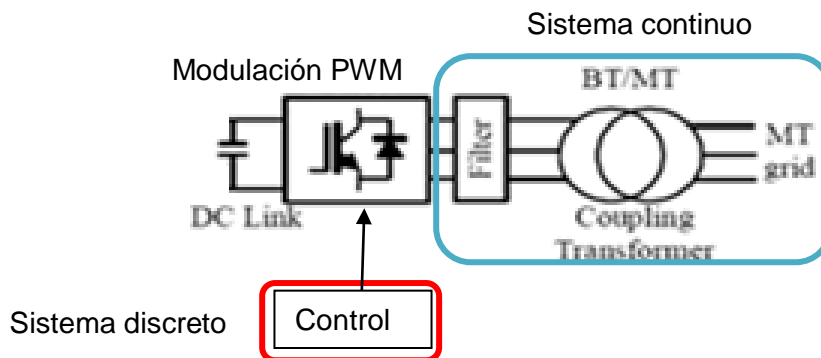


Figura 3. Sistema completo formado por un sistema continuo y otro discreto

Para poder estudiar la estabilidad del sistema es necesario elegir uno de los dos entornos de análisis y, en este caso, se opta por caracterizar todo el sistema en continuo.

Una vez definido el objetivo principal, éste se va a desglosar en varios objetivos específicos. Básicamente consisten, en primer lugar, en proporcionar una base teórica y modelar el sistema a estudiar. Después, se pretende conseguir el procedimiento adecuado para obtener los parámetros de los reguladores e implementarlo de forma adecuada. El siguiente paso será aplicar el método seleccionado a un conjunto de turbinas conectadas en paralelo, de tal forma que se pueda observar si al ir añadiendo más turbinas a la red, la estabilidad se ve afectada y, por tanto, los valores óptimos de dichos parámetros varían y en qué medida lo hacen. Finalmente todo ello se integrará en un programa y se creará una interfaz que permita al usuario particularizar el análisis y obtener los resultados deseados de una forma muy sencilla.

La presente memoria se estructura del siguiente modo. En el capítulo 2, se realiza una breve introducción teórica de todos los conceptos que se consideran necesarios para la comprensión del desarrollo del trabajo. Primero, se presenta una descripción del sistema de conversión FC así como de los lazos de control, donde se comenta el funcionamiento del control del lado red. Después, se trata el problema de cuál va a ser el sistema de referencia en el que modelar el conjunto de sistema físico y control y se justifica la opción tomada. Es necesario modelar toda la etapa de potencia y su control en un único sistema de referencia para poder estudiar la estabilidad del conjunto. A continuación, se realiza una breve explicación de la herramienta que aporta la función de transferencia del lado red y, por último, se comentan los criterios de estabilidad que se van a usar a lo largo del trabajo.

En el capítulo 3 se muestra en detalle el procedimiento analítico desarrollado, a partir del enfoque tradicional, para calcular los parámetros óptimos de los controladores. Se detallan los problemas encontrados así como las conclusiones obtenidas. Será este desarrollo del capítulo 3 el que se use como punto de partida en el capítulo 4 y es en éste en el que se implementa un método iterativo basado en los diagramas de Bode para estudiar la estabilidad y aportar los parámetros óptimos de los reguladores de control.

En el capítulo 5 se aborda el problema de la conexión de varias turbinas en paralelo y, con ello, el problema de estabilidad que pueda surgir.

Toda la explicación relacionada con la interfaz gráfica de la herramienta se presenta en el capítulo 6.

Finalmente, en los capítulos 7 y 8, se presentan las conclusiones, líneas futuras y bibliografía, respectivamente.

A lo largo del trabajo, tanto para simular la etapa de conversión de potencia como el lazo de control se usará la herramienta [MAT14].

2. MARCO TEÓRICO PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1.1 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA FC

En la configuración Full Converter, el generador se encuentra conectado a red a través de un convertidor de potencia. Esta configuración se puede usar tanto con generadores síncronos como con generadores asíncronos de jaula de ardilla.

El convertidor es un sistema back-to-back que se encarga de convertir, primero, la corriente de AC a DC y, a continuación, de DC a AC para inyectarla a la red. El sistema está compuesto por dos convertidores electrónicos, el convertidor lado red (GSC, *Grid Side Converter*) y el convertidor lado máquina (MSC, *Machine Side Converter*). Ambos convertidores manejan el 100 % de la potencia. Un esquema de dicha configuración se observa en la Figura 4 y una explicación más detallada en [FW109].

Se distinguen claramente las dos partes del convertidor, junto con todos sus elementos, lado máquina y lado red, separadas por el bus de continua, cuya función es unir eléctricamente la salida del rectificador con la del inversor y permitir la transferencia de potencia de un elemento a otro. Los componentes que forman el bus de continua son principalmente condensadores y pletinas. A continuación, se presentan brevemente los diferentes elementos existentes, aunque solamente serán de utilidad en el presente trabajo los elementos situados entre el convertidor y la red, en los que se entrará un poco más en profundidad:

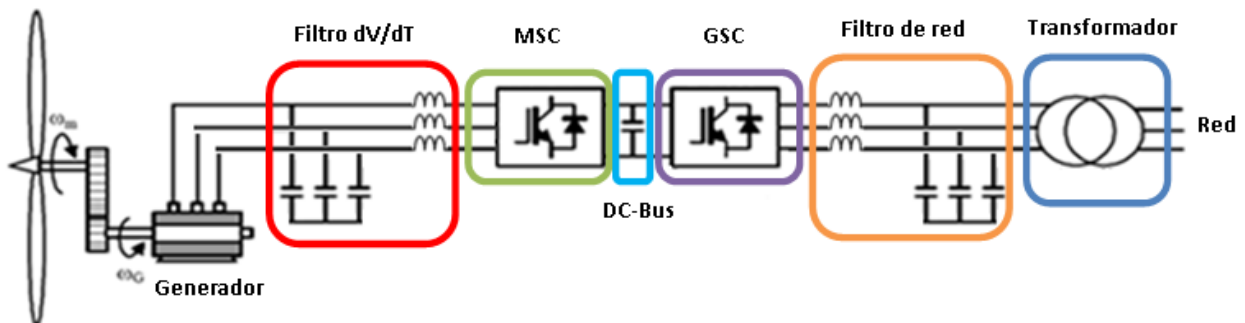


Figura 4. Configuración Full Converter de un sistema trifásico (partes)

Generador eléctrico

Puede ser síncrono de imanes permanentes, síncrono con excitación en el rotor o asíncrono de jaula de ardilla. El uso de multiplicadora no es necesario cuando se usan generadores síncronos, en su lugar se usan generadores multipolo, de forma que a velocidad menor se consiguen las mismas frecuencias.

MSC

Se encarga de la regulación de tensiones y corrientes del rotor así como del control de la potencia. Funciona como rectificador y vierte al bus de continua la energía producida por el generador.

Filtro dV/dt

Su función es proteger el aislamiento del generador. El inversor toma energía del bus de continua para excitar al rotor y en ese proceso se varía muy rápidamente entre $+V_{bus}$ y $-V_{bus}$. Estos saltos de tensión pueden llegar a dañar el estator de la máquina. Con el filtro se limita la derivada dV/dt a un máximo de $1\text{ kV}/\mu\text{s}$, evitando los posibles daños. Es un filtro sencillo compuesto por inductancias con resistencias en paralelo o inductancias con capacidades que conectan las tres fases.

GSC

Es el que se encarga de mantener constante la tensión de bus. Previo a la operación normal del convertidor se deberá realizar la precarga del bus de continua. Trabaja como inversor, vertiendo a la red la energía que extrae del bus de continua.

Filtro de armónicos y transformador de BT a MT

El filtro de red es el encargado de filtrar los armónicos de corriente y tensión generados debido a la modulación PWM utilizada en los convertidores. El filtro propiamente dicho consiste en una inductancia en serie con el convertidor y una rama RC en paralelo, aprovechando las inductancias del transformador y de la red para completar la topología L-RC-L. La función de las resistencias es la de amortiguar las corrientes hacia los condensadores. En el presente trabajo se reduce el sistema trifásico a un modelo monofásico equivalente a cada fase de forma que el conjunto del filtro de armónicos, el transformador y la red queda tal y como se observa en la Figura 5:

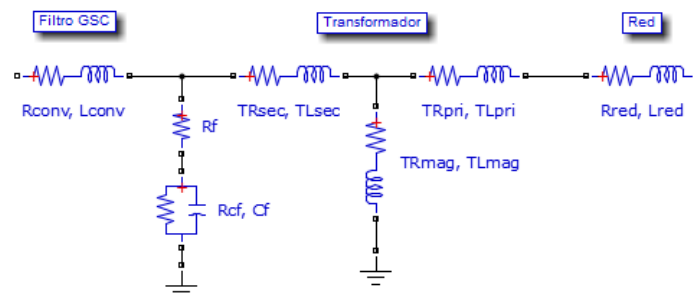


Figura 5. Sistema de lado red (Simpower, Simulink)

Conociendo las ecuaciones de las impedancias tanto de la inductancia como del condensador se puede simplificar el modelo anterior y comprender el funcionamiento del filtro:

$$Z_L = j\omega L \quad (2.1) \qquad Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.2)$$

La corriente circulará por la rama que menos se oponga a ella, es decir, que menos impedancia presente. Así, a bajas frecuencias Z_L es baja y Z_C es alta, por lo que las corrientes circularán hacia la red. Mientras que a altas frecuencias, Z_L es alta y Z_C es baja, de forma que dichas corrientes son filtradas y no circulan por la red.

Tanto las inductancias como las capacidades varían su impedancia en función de la frecuencia, por ello, a determinada frecuencia, pueden llegar a resonar. Esto se produce cuando la impedancia de la inductancia equivalente es la misma que la de la capacidad pero de signo contrario.

Para alta frecuencia, la rama de magnetización del transformador se puede despreciar, de forma que se tiene la secuencia L-RC-L ya descrita. Además, para calcular las frecuencias de resonancia se pueden despreciar las resistencias de amortiguamiento ya que este efecto no es

muy grande y su influencia en las frecuencias de resonancia es poco significativa. El filtro, con las consideraciones anteriores, se observa en la Figura 6:

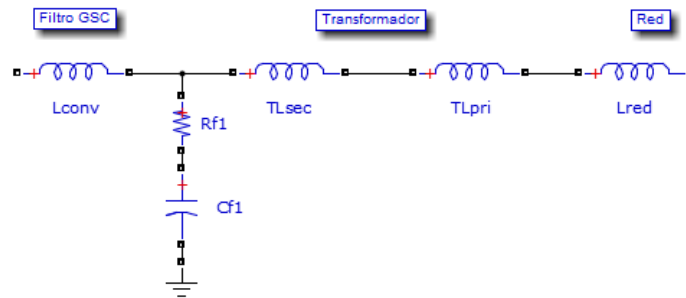


Figura 6. Sistema lado red simplificado

En este filtro se tienen dos frecuencias de resonancia, serie y paralelo. La frecuencia de resonancia serie será aquella para la que se igualen los valores de la impedancia del condensador y la impedancia equivalente de las inductancias del transformador y red, y la frecuencia de resonancia paralelo será aquella para la que entren en resonancia el condensador y la inductancia de salida del convertidor.

Las frecuencias de resonancia para dicho filtro se pueden calcular usando la siguiente fórmula y variando el valor de la inductancia para cada caso:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad L_{serie} = L_{conv} , \quad L_{par} = TL_{pri} + TL_{sec} + L_{red} \quad (2.3)$$

Donde L_{conv} es la inductancia a la salida del convertidor, TL_{sec} es la inductancia del secundario del transformador, TL_{pri} es la inductancia del primario, L_{red} es la inductancia de red y C es la capacidad del condensador del filtro de armónicos.

2.1.2 LAZOS DE CONTROL

El presente trabajo se centra en el control del convertidor del lado red, por lo que, en este apartado, se profundizará en los lazos que lo constituyen.

En la Figura 7, se puede observar un esquema del control del lado red de un sistema FC:

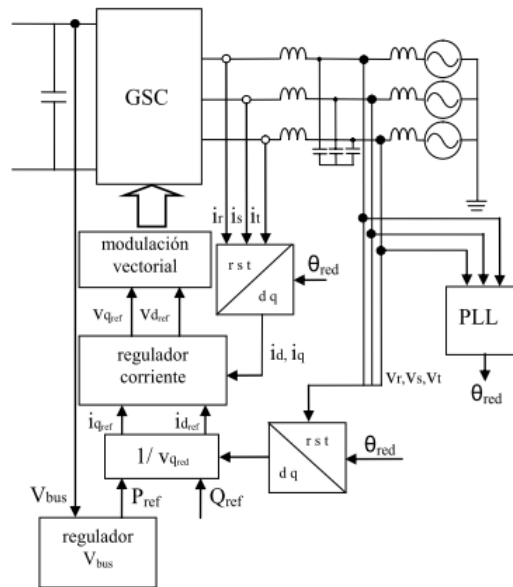


Figura 7. Sistema físico y control del lado red

Para poder realizar la transformación de ejes RST a ejes dq, tanto de corrientes como de tensiones, se debe conocer el ángulo a utilizar. Para orientar correctamente los ejes se usa un sistema PLL, consistente en un lazo con un regulador PI, que, a partir de las medidas de la tensión de red, se encarga de proporcionar el ángulo y la frecuencia de la misma. A la hora de realizar el control se puede elegir si se orienta el eje d o el eje q al vector de tensión de red, siendo la otra componente, q o d respectivamente, nula.

La referencia de la potencia activa se obtiene del regulador de tensión de bus. El controlador usado es un PI que se encarga de evacuar la potencia a la red de forma que la tensión de bus permanezca constante. La potencia evacuada coincide con la potencia extraída del generador.

La referencia de potencia reactiva será aquella impuesta por el operador de la red eléctrica al que esté conectado el parque eólico.

Al tener dichas referencias, realizando unas operaciones sencillas se consiguen las referencias de corriente a usar en el lazo de corriente. Con otro regulador PI se consigue disminuir el error entre la intensidad de referencia y la medida, de forma que a la salida del controlador se obtengan las tensiones a usar en la modulación.

Mediante la modulación vectorial se obtienen las diferentes órdenes de disparo de los IGBTs del convertidor GSC, que serán los que consigan convertir la tensión de continua del bus en tensión alterna y, con ello, se pueda inyectar potencia activa, y reactiva si es necesario, a la red.

Una vez realizada esta breve explicación, se procede a comentar con más detalle algunos elementos y procesos involucrados en el control del GSC.

2.1.2.1 Ejes rotatorios dq

Para poder realizar el control en ejes dq es necesario realizar el cambio de ejes rst a ejes dq. Para ello, se deberá aplicar la transformada de Clarke y la transformada de Park.

- Transformada de Clarke

Las variables eléctricas de un sistema trifásico RST se pueden transformar en otras referidas a un sistema α , β y 0, llamadas componentes de Clarke. En este caso, la componente homopolar se desprecia, por ello solamente se calculan las componentes α y β . La transformación consiste

en proyectar las variables de los ejes RST ($0^\circ, 120^\circ$ y 240°) en los nuevos ejes α y β , desfasadas 90° :

$$v_{\alpha\beta} = v_R + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot v_S + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cdot v_T = v_\alpha + jv_\beta \quad (2.4)$$

$$v_\alpha = \frac{2}{3} \cdot \left(v_R - \frac{1}{2} v_S - \frac{1}{2} v_T \right) \quad (2.5)$$

$$v_\beta = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_S - \frac{\sqrt{3}}{2} v_T \right) \quad (2.6)$$

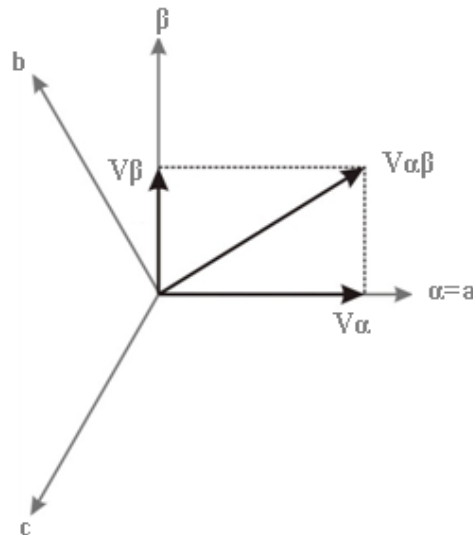


Figura 8. Ejes de referencia abc y alpha-beta

En adelante, se usará el convenio americano o invariante en tensión, de forma que se multiplicará el valor anterior por $2/3$ para que la tensión no varíe, ya que con las operaciones anteriores se obtiene una tensión $3/2$ mayor de la inicial.

La transformada inversa de Clarke se calculará de la misma forma pero pasando de ejes alpha beta a ejes RST:

$$\begin{bmatrix} v_R \\ v_S \\ v_T \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

- Transformada de Park

Para obtener una tensión constante se puede realizar una segunda transformación y pasar de ejes fijos a ejes rotatorios dq, que giran a la pulsación de las tensiones. La transformación completa desde ejes RST a ejes dq se conoce como transformada de Park.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = e^{-j\omega t} v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = C_{rot} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

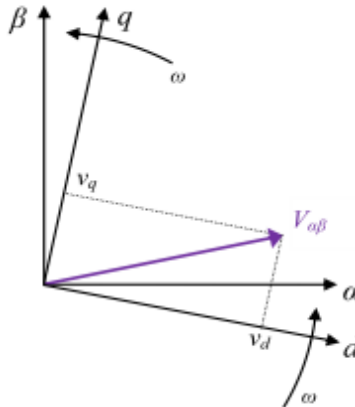


Figura 9. Ejes de referencia alfabeta y dq

Si las tensiones forman un sistema equilibrado y se usa un sistema de referencia que gira a la pulsación de las tensiones, las componentes V_d y V_q pasan a ser constantes, y su valor dependerá del desfase entre el vector de tensión y los ejes de referencia.

En caso de tratarse de un sistema desequilibrado, se deberá proceder, en primer lugar, a la separación de secuencias, directa e inversa, y, después, se realizará el mismo proceso de transformación ya descrito.

2.1.2.2 Lazo de corriente

El lazo de corriente es aquel que se encarga de controlar que la intensidad que se inyecta en la red sea la deseada, es decir, la correspondiente a la potencia generada por el generador eléctrico. Este lazo debe ser rápido y suele tener un ancho de banda aproximadamente 10 veces mayor que el del lazo de tensión que regula el bus de continua.

Consta principalmente de un controlador PI, que se encarga de reducir al máximo la diferencia entre la intensidad inyectada y la deseada, los términos cruzados de desacoplo y la pre-alimentación de tensión (feed-forward). Se tratan las corrientes en d y q por separado, por lo que se tienen dos controladores.

- **Controlador PI**

Se encarga de reducir al máximo el error entre la consigna de corriente y la corriente medida. El controlador queda de la siguiente forma:

$$PI = kp + \frac{ki}{s} = kp + \frac{kp}{Tn \cdot s} \quad (2.9)$$

Como se observa, la constante de proporcionalidad, K_p , afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control, mientras que la constante de tiempo de la acción integral, T_n , se encarga de regular exclusivamente la velocidad de la acción integral.

- **Desacoplo de corrientes en dq**

A continuación se detalla en qué consisten los lazos de desacoplo de corrientes en dq que intervienen en el lazo de control del lado red [EPM16].

La tensión de red en ejes de referencia fijos $\alpha\beta$ es la siguiente:

$$\vec{e}_{\alpha\beta} = L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} + R\vec{i}_{\alpha\beta} + \vec{v}_{\alpha\beta} \quad (2.10)$$

De forma que al referirla a ejes dq queda de la siguiente forma:

$$\vec{e}_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta(t)} = \left(L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} + R\vec{i}_{\alpha\beta} + \vec{v}_{\alpha\beta} \right) \cdot e^{-j\theta(t)} \quad (2.11)$$

$$\vec{e}_{dq} = L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} e^{-j\theta(t)} + R\vec{i}_{dq} + \vec{v}_{dq} \quad (2.12)$$

Usando las propiedades de derivación se sabe que:

$$L \frac{d(\vec{i}_{\alpha\beta} e^{-j\theta(t)})}{dt} = L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} e^{-j\theta(t)} - \frac{jd\theta(t)}{dt} e^{-j\theta(t)} L\vec{i}_{\alpha\beta} \quad (2.13)$$

De forma que la tensión en ejes dq es:

$$\begin{aligned} \vec{e}_{dq} &= L \frac{d(\vec{i}_{\alpha\beta} e^{-j\theta(t)})}{dt} + \frac{jd\theta(t)}{dt} e^{-j\theta(t)} L\vec{i}_{\alpha\beta} + R\vec{i}_{dq} + \vec{v}_{dq} \\ &= L \frac{d\vec{i}_{dq}}{dt} + j\omega L\vec{i}_{dq} + R\vec{i}_{dq} + \vec{v}_{dq} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Por lo que la tensión encargada de la conmutación quedará de la siguiente forma:

$$\vec{v}_{dq} = -L \frac{d\vec{i}_{dq}}{dt} - R\vec{i}_{dq} - j\omega L\vec{i}_{dq} + \vec{e}_{dq} \quad (2.15)$$

Además si se separan las componentes de d y q se obtiene que:

$$-i_{dq} \cdot j\omega L = -(i_d + jI_q) \cdot j\omega L = -i_d j\omega L + I_q \omega L \quad (2.16)$$

Por ello, para conseguir desacoplar los ejes d y q, de forma que cualquier cambio en la componente I_d no afecte a la componente I_q y viceversa, se deben añadir a la salida del PI dichos términos cambiados de signo:

$$i_d j\omega L - I_q \omega L \quad (2.17)$$

- **Feed-Forward de tensión**

La tensión que se suma a la salida del controlador (feed-forward) se debe filtrar previamente, para ello se usa un sencillo filtro paso bajo.

Para evitar la influencia de la tensión de red en la rapidez y estabilidad del sistema se compensa su influencia en el control, de forma que se suman los términos correspondientes a la tensión en ejes dq a la salida del controlador.

A la salida de los controladores se suma tanto la tensión de red como los términos cruzados de desacoplo, y, dicha tensión será la que se use para realizar la modulación vectorial que enviará las señales para la conmutación de los IGBTs del convertidor.

2.1.2.3 Lazo de tensión

Es el encargado de mantener la tensión de bus constante e incluye en su interior al lazo de corriente, por ello tendrá que ser más lento, tal y como se ha mencionado anteriormente.

Consta también de un PI gracias al cual se obtiene la potencia activa y con ella y con la potencia reactiva deseada, mediante unos cálculos, se obtienen las corrientes de referencia, de forma que ambos lazos quedan unidos.

En el presente proyecto no se calculan los parámetros del PI del lazo de tensión ya que se considera que es un controlador muy robusto y no necesita una herramienta para su cálculo. De todas formas, este proceso sería fácil de incluir en la herramienta diseñada.

2.1.2.4 Control dual de corrientes

- **Desequilibrio en la red**

Cuando un sistema de tensiones trifásico está compuesto por tres ondas de distinta amplitud o desfasadas entre ellas un ángulo diferente a 120° se dice que es un sistema desequilibrado. Dichos vectores se pueden descomponer en tres conjuntos de tres vectores de igual magnitud cuya suma da como resultado los vectores del sistema desequilibrado. Los tres conjuntos, denominados *secuencias*, son:

- La secuencia directa o positiva: es aquella que sigue el orden normal de las fases: fase R, fase S y fase T, y el desfase es de 120° .
- La secuencia inversa o negativa: es aquella que presenta el orden de las fases invertido: fase S, fase R y fase T, y el desfase es también de 120° .
- La secuencia homopolar: tiene las tres fases alineadas y no se va a tener en cuenta en este trabajo.

Un sistema desequilibrado se puede representar en ejes alpha-beta aplicando la transformada de Clarke. Al realizarla se obtiene un vector que es la suma de los vectores asociados a la secuencia directa y a la inversa respectivamente, cada uno girando en un sentido. Este vector se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_{\alpha\beta} = V_p \cdot e^{j\omega t} + V_n \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.18)$$

Donde V_p corresponde a la tensión de la secuencia directa y V_n a la tensión de la secuencia inversa. Los vectores correspondientes a ambas tensiones se observan en la Figura 10.

La aparición de la secuencia inversa hace que sea muy difícil calcular el ángulo del vector tensión de red. Por ello, es necesario aislar la secuencia directa de la tensión de red para conocer su ángulo. Además, otro problema que se produce debido a la existencia de secuencia inversa es la aparición de potencias oscilantes al doble de la frecuencia de red.

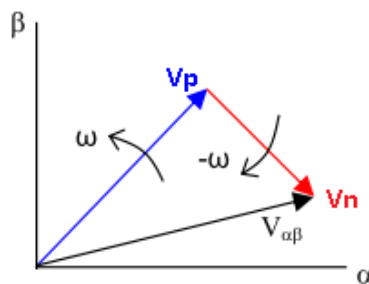


Figura 10. Secuencia directa e inversa

- **Separación de secuencias y control dual de corrientes**

Para controlar de forma correcta las corrientes de referencia en secuencia inversa hay que modificar el control usado cuando se considera que únicamente existe la secuencia directa. Aunque existen varias opciones se opta por la que consiste en separar ambas secuencias y realizar el control de forma independiente, que se conoce como control dual de corrientes [HON99], [JUA14].

Para la separación de secuencias se pueden usar varios métodos, en este caso, se opta por usar un filtro de retardo de cuarto de periodo o DSC₄ "Delayed Signal Cancellation", explicado en [SVE07].

Este filtro consigue eliminar las componentes oscilantes al doble de la frecuencia de red. Será de gran utilidad para la separación de secuencias ya que si se multiplica a ambos lados de la ecuación anterior por el término de rotación, en ambos sentidos, se consigue transformar la secuencia directa a dq y que la secuencia inversa oscile al doble de la fundamental, y viceversa:

$$V_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\omega t} = (V_{pdq} \cdot e^{j\omega t} + V_{ndq} \cdot e^{-j\omega t}) \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.20)$$

$$V_{dq} = V_{ndq} \cdot e^{2j\omega t} + V_{pdq} \quad (2.21)$$

$$V_{\alpha\beta} \cdot e^{j\omega t} = (V_{pdq} \cdot e^{j\omega t} + V_{ndq} \cdot e^{-j\omega t}) \cdot e^{j\omega t} \quad (2.22)$$

$$V_{dq} = V_{pdq} \cdot e^{2j\omega t} + V_{ndq} \quad (2.23)$$

Al aplicar el filtro se eliminan las componentes que oscilan al doble de la frecuencia de red. De esta forma se tienen las secuencias separadas y se puede realizar el control de forma independiente.

La función del filtro, en analógico, para cada una de las secuencias es:

$$DSC_{dir} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + je^{-\frac{sT}{4}}\right) \quad (2.24)$$

$$DSC_{inv} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - je^{-\frac{sT}{4}}\right) \quad (2.25)$$

El esquema en bloques se presenta en la Figura 11:

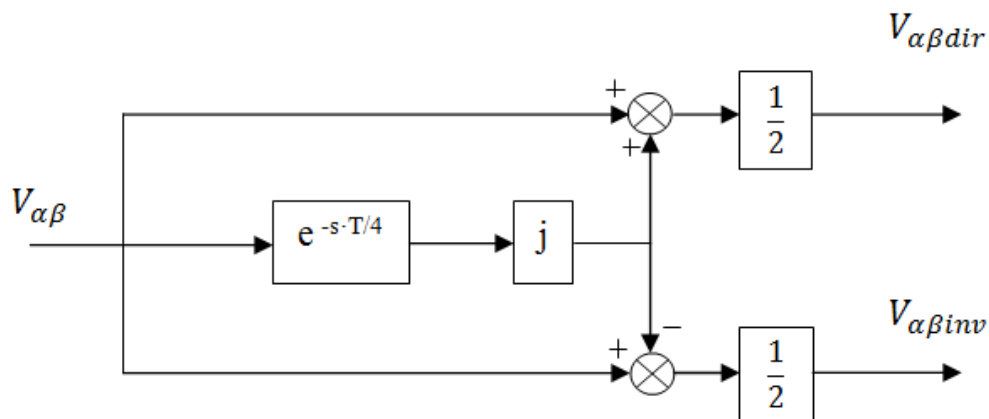


Figura 11. Filtro DSC de cuarto de periodo

En la Figura 12, se puede ver con claridad, de forma vectorial, como las componentes se suman o se anulan, para obtener la secuencia directa y la inversa respectivamente. En primer lugar, se retrasa cada vector un cuarto de periodo, en el sentido de giro correspondiente a cada secuencia, y, en segundo lugar, se adelantan 90° ambos vectores, tal y como se recoge en las ecuaciones 2.24 y 2.25.

Al realizar el control en ejes dq se tienen, por tanto, cuatro lazos de corriente, dos por cada secuencia. Todo el esquema de control se puede observar en la Figura 13.

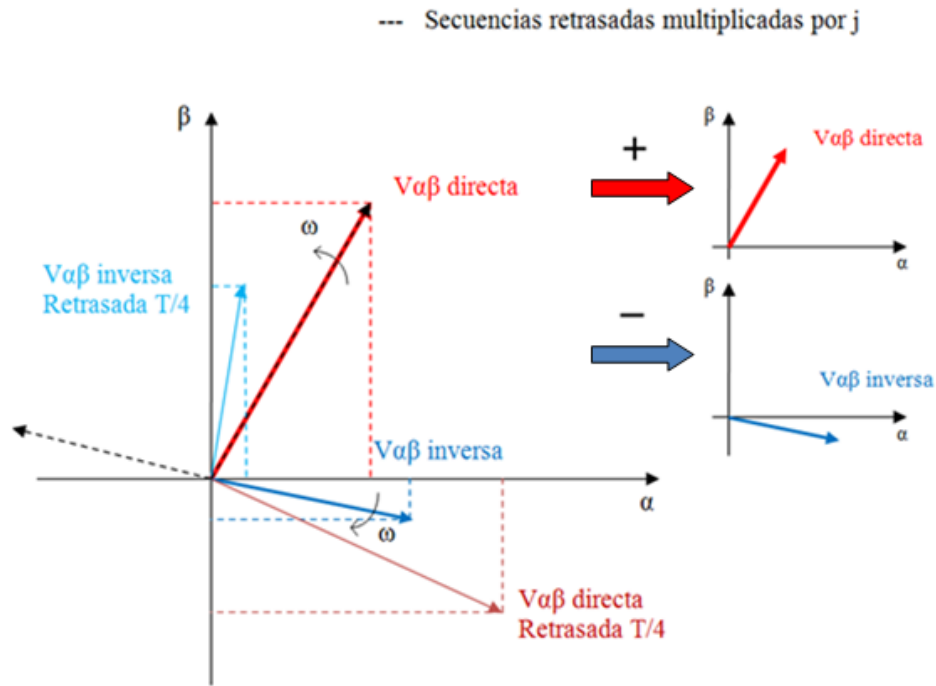


Figura 12. Desarrollo vectorial del filtro DSC₄

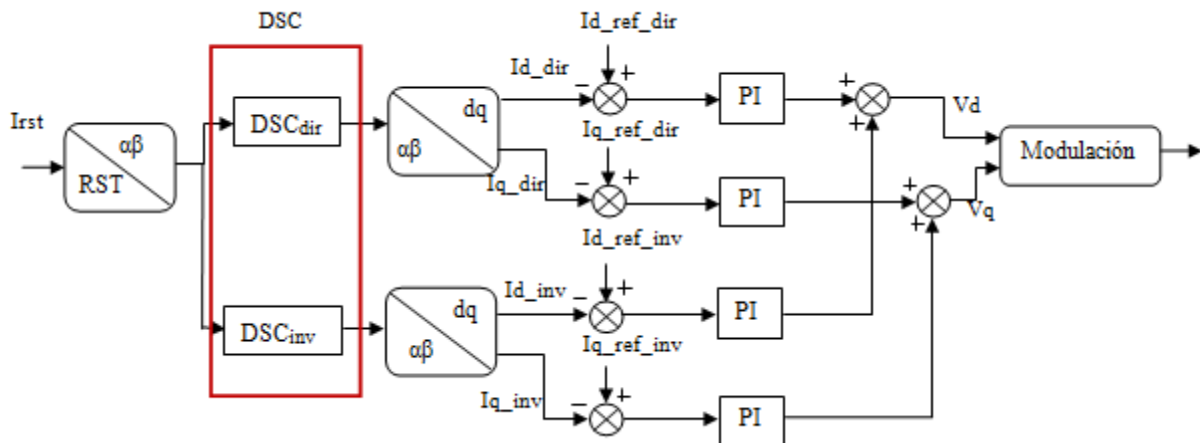


Figura 13. Control dual de corrientes

2.2 MODELADO DEL SISTEMA COMPLETO

Tal y como se ha comentado, el control se realiza en ejes de referencia dq mientras que la planta, convertidor junto con la red, consta de las tres fases RST. Para realizar el diagrama de bode del conjunto, es necesario tener el sistema completo en el mismo sistema de referencia, por lo que se plantean dos opciones:

- Convertir las funciones de transferencia del sistema físico al sistema de referencia dq.
- Transformar tanto el sistema como las funciones de transferencia del control a ejes $\alpha\beta$. Como se trata de un estudio frecuencial, los sistemas de referencia RST y alpha-beta se consideran el mismo.

A continuación, se estudian ambas opciones y se decide cuál de las dos es la más adecuada.

2.2.1 MODELADO DEL SISTEMA EN EJES DQ

Para estudiar la estabilidad del sistema, se debe tener todo el conjunto del sistema físico y el control en el mismo marco de referencia. Una de las opciones es transformar las funciones de transferencia que dan lugar a la planta a ejes dq.

Para ello, se deben pasar cada uno de los elementos que forman la planta a ejes dq. La resistencia no se verá afectada, porque su impedancia es constante, pero la inductancia y la capacidad sí.

La relación entre la tensión y la corriente de un condensador en ejes dq es:

$$i_{dqC} = C_{rot} \cdot i_{RSTC} = C_{rot} \cdot C \cdot \frac{d(C_{rot}^{-1} \cdot v_{dqC})}{dt} \quad (2.26)$$

Utilizando de nuevo las propiedades de las derivadas:

$$i_{dqC} = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \cdot \frac{dv_{dqC}}{dt} + \begin{pmatrix} 0 & -C\omega \\ C\omega & 0 \end{pmatrix} \cdot v_{dqC} \quad (2.27)$$

La Figura 14 muestra la equivalencia entre RST y dq. Se puede ver como en el modelo dq aparecen dos fuentes de corriente, positiva y negativa, que corresponden al efecto que tiene la tensión en d en la corriente en q y al revés:

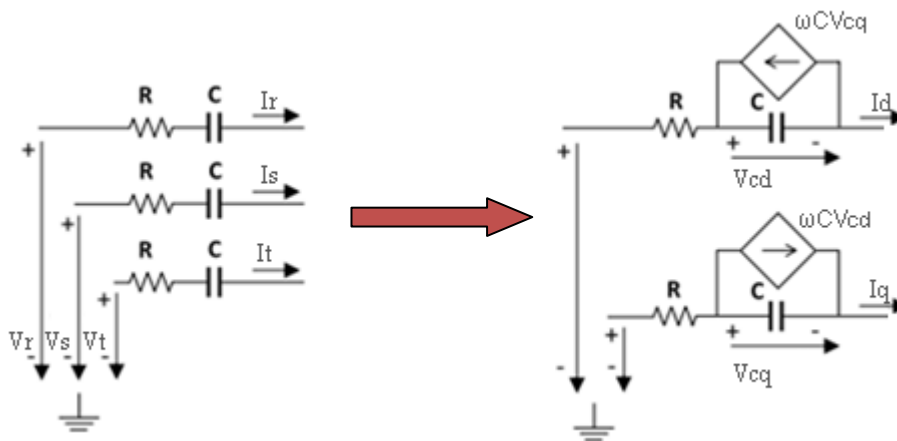


Figura 14. Modelado de una capacidad en dq

Estas fuentes de corriente dependen del valor de la capacidad, de la pulsación a la frecuencia de giro de los ejes dq, 50 Hz, y del valor de la tensión en ejes d o q, ya se trate del eje q o d respectivamente.

La transformación de la inductancia se hace realizando el mismo procedimiento pero utilizando la fórmula de la tensión que cae en una bobina, y tiene como resultado dos fuentes de tensión que dependen del valor de la inductancia, de la pulsación a 50 Hz y de las corrientes en dq.

La Figura 15 muestra el circuito equivalente en dq de un filtro LC:

Para conseguir el modelado completo de la planta en dq se debe añadir una fuente de corriente en paralelo al condensador del filtro y una fuente de tensión por cada inductancia, que tal y como se verá más adelante, en el modelo se tienen la inductancia de salida del convertidor, las del primario y secundario del transformador y la de red. Se deben utilizar dos modelos, uno para el eje d y otro para el eje q, en los que se incluyan los términos cruzados de corriente y de tensión.

Además, como en este trabajo se van a considerar tanto la secuencia directa como la inversa, se deberán tener cuatro modelos de simulación, en lugar de dos. De esta forma, para modelizar el sistema en dq se debería tener un modelo de Simpower para cada eje y para cada secuencia, es decir, 4 modelos unifilares.

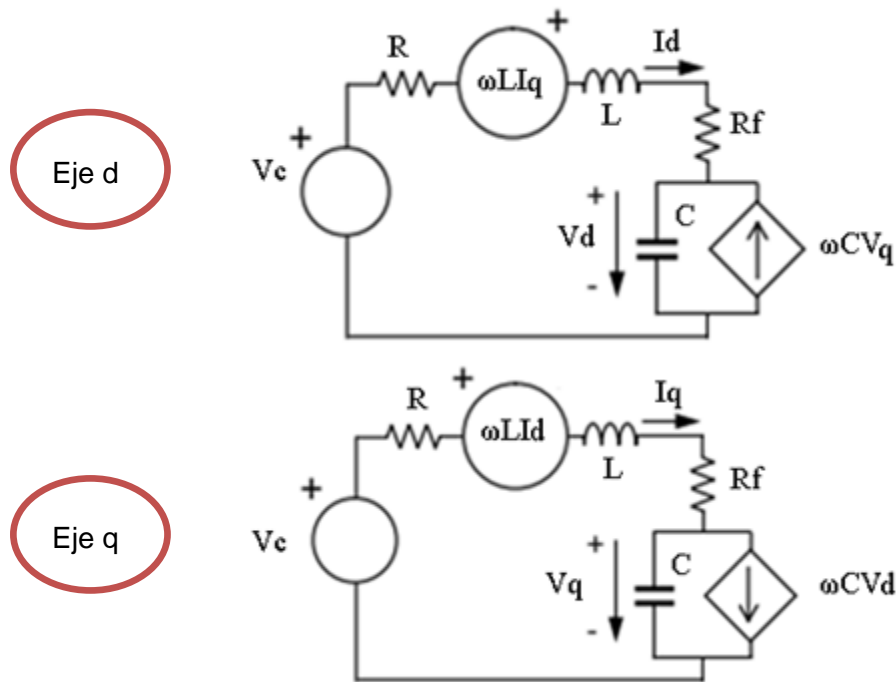


Figura 15. Modelado del sistema físico en ejes dq

2.2.2 MODELADO DEL SISTEMA EN EJES ALPHA-BETA

La transformación de dq a $\alpha\beta$ es muy sencilla. Consiste en integrar a ambos lados de elementos de control, como puede ser el controlador, y realizar los cálculos necesarios hasta obtener la función de transferencia equivalente. Todo esto se explica en detalle en [CHA06] y [AS3916].

El procedimiento consiste en aplicar los operadores rotatorios a ambos lados del sistema a transformar y desplazar uno de ellos para conseguir el nuevo sistema de referencia:

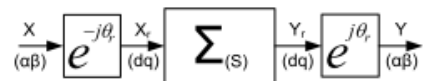


Figura 16. Transformación de un sistema de referencia a otro

Para comprender dicha transformación se presentan a continuación dos ejemplos: el primero corresponde a la transformación de dq a $\alpha\beta$ de un filtro paso bajo de tensión, y el segundo a la transformación de un controlador PI:

- Transformación filtro paso bajo de tensión

El filtro a transformar es el siguiente:

$$\Sigma = \frac{V_{fdq}}{V_{dq}} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.28)$$

Pasando este sistema a dominio temporal obtenemos:

$$V_{fdq} \cdot (1 + \tau s) = V_{dq} \quad (2.29) \quad \rightarrow \quad v_{fdq} + \tau \cdot \frac{dv_{fdq}}{dt} = v_{dq} \quad (2.30)$$

Multiplicando a ambos lados por $e^{j\theta_r}$ y sumando y restando el término $\tau \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot v_{fdq}$:

$$e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq} + e^{j\theta_r} \cdot \tau \cdot \frac{dv_{fred}}{dt} = e^{j\theta_r} \cdot v_{dq} = v_{\alpha\beta} \quad (2.31)$$

$$e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq} + \tau \cdot e^{j\theta_r} \cdot \frac{dv_{fred}}{dt} + \tau \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot v_{fdq} - \tau \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot v_{fdq} = v_{\alpha\beta} \quad (2.32)$$

Conociendo la fórmula de la derivada de un producto y que la pulsación es la derivada del ángulo se obtiene que:

$$e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq} + \tau \cdot \frac{d(e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq})}{dt} - \tau \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \omega_r \cdot v_{fdq} = v_{\alpha\beta} \quad (2.33)$$

Desarrollando la ecuación anterior y aplicando la transformada de Laplace, se obtiene la función de transferencia en ejes $\alpha\beta$:

$$\tau \cdot \frac{d(e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq})}{dt} = v_{\alpha\beta} - e^{j\theta_r} \cdot v_{fdq} + \tau \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \omega_r \cdot v_{fdq} \quad (2.34)$$

$$\tau \cdot \frac{d(v_{f\alpha\beta})}{dt} = v_{\alpha\beta} - v_{f\alpha\beta} \cdot (1 - \tau \cdot j\omega_r) \quad (2.35)$$

$$\tau \cdot s \cdot V_{f\alpha\beta} = V_{\alpha\beta} - V_{f\alpha\beta}(1 - \tau \cdot j\omega_r) \quad (2.36)$$

$$\frac{V_{f\alpha\beta}}{V_{\alpha\beta}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot (s - j\omega_r)} \quad (2.37)$$

- Transformación controlador PI

Como ya se sabe, el controlador PI está formado por una parte proporcional y otra integral. Solo se va a realizar el cambio de la parte integral ya que la parte proporcional no varía:

$$\frac{V_{dq}}{I_{dq}} = kp + \frac{ki}{s} \quad (2.38) \quad \text{Solo se considera:} \quad \frac{V_{int,dq}}{I_{dq}} = \frac{ki}{s} \quad (2.39)$$

En primer lugar se pasa a dominio temporal:

$$\frac{dv_{int,dq}}{dt} = ki \cdot i_{dq} \quad (2.40)$$

Se multiplica a ambos lados por el término de rotación $e^{j\theta_r}$ y se suma y resta el término $v_{dq} \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}$:

$$e^{j\theta_r} \cdot \frac{dv_{int,dq}}{dt} = ki \cdot i_{dq} \cdot e^{j\theta_r} = ki \cdot i_{\alpha\beta} \quad (2.41)$$

$$e^{j\theta_r} \cdot \frac{dv_{int,dq}}{dt} + v_{dq} \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} - v_{dq} \cdot j e^{j\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} = ki \cdot i_{\alpha\beta} \quad (2.42)$$

Agrupando, desarrollando y volviendo al dominio de Laplace se tiene que:

$$\frac{dv_{\alpha\beta}}{dt} - j v_{\alpha\beta} \cdot \omega_r = ki \cdot i_{\alpha\beta} \quad (2.43)$$

$$V_{\alpha\beta} - V_{\alpha\beta} \cdot j\omega_r = ki \cdot I_{\alpha\beta} \quad (2.44)$$

$$\frac{V_{\alpha\beta}}{I_{\alpha\beta}} = \frac{ki}{s - j\omega_r} \quad (2.45)$$

De forma que la función de transferencia del PI en ejes $\alpha\beta$ queda de la siguiente forma:

$$P_{dir}(s) = kp + \frac{ki}{s - j\omega_r} \quad (2.46)$$

- Transformación generalizada

Como conclusión de las anteriores transformaciones se puede decir que cuando se trate de la secuencia directa el cambio a realizar para pasar de dq a $\alpha\beta$ será sustituir la 's' original por 's-j ω '.

En caso de tratarse de la secuencia inversa la conversión será la siguiente: la 's' usada en dq se transformará a 's+j ω '.

2.2.3 CONCLUSIÓN

Como se ha podido observar, matemáticamente, utilizando MATLAB, el paso del control de 2 ejes móviles a 2 ejes fijos es muy sencillo. De esta forma, se evitan los problemas relacionados con la implementación de fuentes de tensión y de corriente en Simpower (MATLAB).

Además, al tener la planta en dq y, por tanto, tener cuatro modelos de Simpower, el procedimiento para obtener la función de transferencia de la planta ya no sirve, se debería hacer de otra forma, seguramente más complicada, y desconocida por el momento.

Otro motivo que hace que la opción escogida sea la representación en alpha-beta es que el método de separación de secuencias, tal y como está en la herramienta, no se puede usar con el modelo en dq. Para usar el DSC implementado se necesita tener en el mismo lazo las dos secuencias y los dos ejes dq. Se debería obtener la planta en dq, transformarla a alpha-beta y después volver a dq, y eso no tiene mucho sentido al tener la posibilidad de modelizar la planta directamente en alpha-beta.

2.3 PUNTO DE PARTIDA: FUNCIÓN DE CÁLCULO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN ALPHA-BETA

Ingeteam posee una herramienta que estudia la estabilidad del sistema de lado red.

La herramienta parte de un modelo de simulación en el que se encuentra modelado el sistema eléctrico, es decir, la impedancia del convertidor, el filtro de red, el transformador de BT y la red. En este caso, el sistema consta de los siguientes elementos:

- Inductancia y resistencia del convertidor (Lconv, Rconv).
- Resistencia y capacidad, con su resistencia en paralelo, del filtro de armónicos (Rf, Rcf, Cf).
- Modelado del transformador: resistencia e inductancia del primario, secundario y de magnetización (TRpri, TLpri, TRsec, TLsec, TRmag, TLmag).
- Inductancia y resistencia de red (Rred, Lred).

En la Figura 17, se puede observar el modelo de Simpower usado en este trabajo:

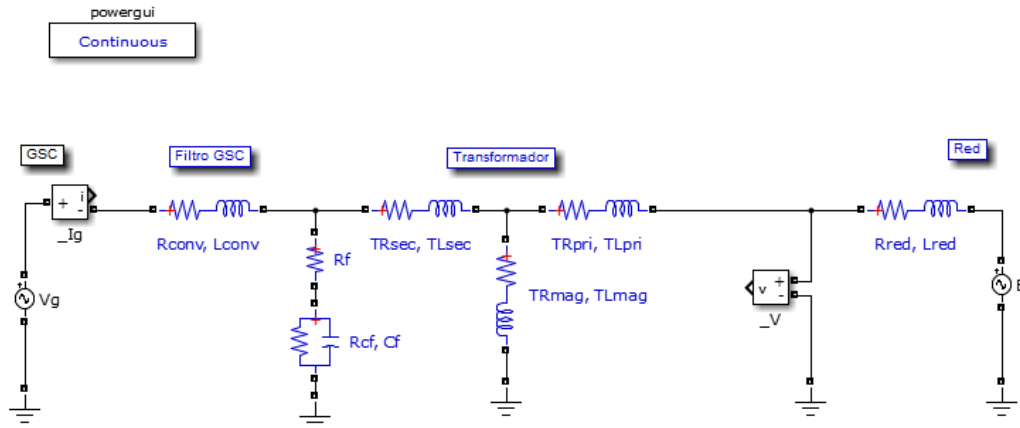


Figura 17. Modelo unifilar del sistema eléctrico de potencia en RST

Como ya se ha comentado, el modelo en alpha-beta es muy sencillo ya que carece de términos cruzados de corriente y tensión, que son los que originan los problemas de ejecución del modelo.

Los procesos que lleva a cabo dicha herramienta se detallan a continuación:

- I. Cálculo de la planta.
- II. Cálculo de la función de transferencia para usar en el feed-forward.
- III. Términos cruzados de desacoplo de los ejes dq.
- IV. Controlador PI.
- V. Digitalización.
- VI. Cálculo de la función de transferencia del lazo de corriente (lazo abierto y lazo cerrado).

Para calcular la función de transferencia, tanto de la planta como del feed-forward, se usa el comando *power_analyze*. Esta instrucción obtiene el espacio de estados de un sistema de Simpower. Una vez obtenido se puede transformar a función de transferencia usando la instrucción *ss2tf*, e indicando qué entrada y qué salida se consideran en cada caso.

Para obtener la función de transferencia de la planta se considera como entrada la tensión del convertidor y como salida la intensidad de salida del mismo. Para calcular la función de transferencia a usar en el feed-forward se debe usar la función ya calculada y la que se obtiene al considerar como entrada la tensión del convertidor y como salida la tensión de red. Relacionando estas dos funciones se obtiene la función deseada que considera como entrada la intensidad del convertidor y como salida la tensión de red.

Tal y como se ha comentado en la introducción, se va a modelizar todo el conjunto de sistema físico y control como un sistema continuo.

La modulación se aproximará como un retenedor de orden cero y un retardo de un periodo de control, que se aproxima como $e^{-s \cdot T_{con}}$.

Será dicha herramienta la que aporte la función de transferencia sin tener en cuenta el regulador PI, tanto en el caso de secuencia directa, como en el de secuencia directa e inversa.

2.4 CRITERIO PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD

Cuando se excita un sistema con una entrada sinusoidal, a la salida del sistema se obtiene otra señal sinusoidal de la misma frecuencia pero diferente fase y amplitud. Esta relación de fase y de amplitud es la que se muestra en el diagrama de Bode, dependiendo de la frecuencia de la señal de entrada.

El diagrama de Bode está formado por dos gráficos diferentes, en los que se representan la magnitud y la fase de un sistema en función de la frecuencia. Ambos gráficos se representan en escala logarítmica y se expresa, la magnitud en decibelios (dB), y la fase en grados.

Para estudiar la estabilidad de un sistema en lazo cerrado se debe realizar el diagrama de Bode del sistema en lazo abierto. Para que un sistema sea estable, atendiendo al diagrama de Bode, el margen de fase y el margen de ganancia deben ser positivos.

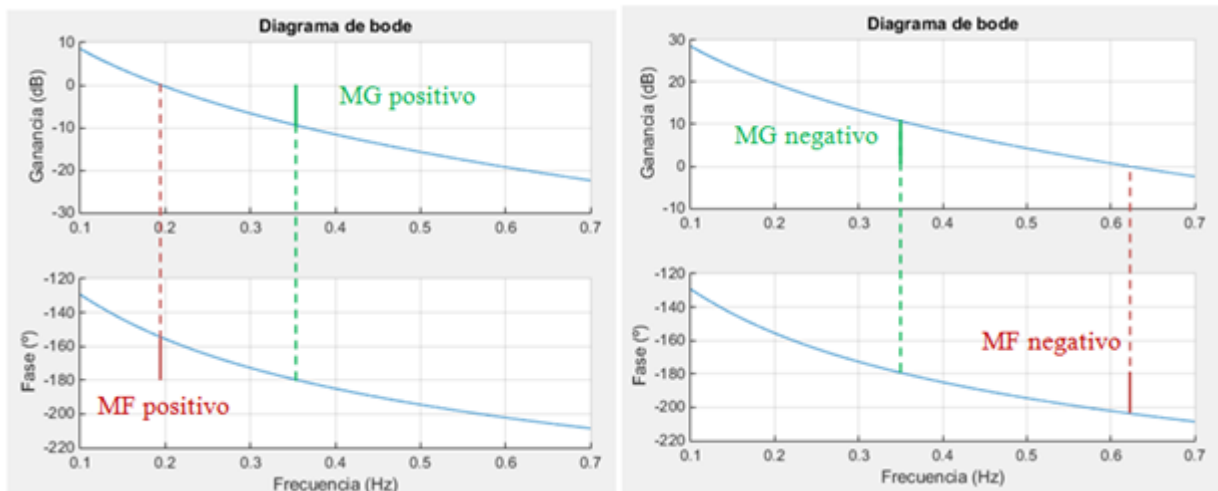


Figura 18. Margen de fase y de ganancia

El **margen de ganancia** es la inversa de la razón entre las amplitudes a la frecuencia de cruce (cuando la fase es -180°). El margen de ganancia es una medida importante del sistema porque:

- Es una medida de la proximidad del sistema a la zona de inestabilidad.
- Cuanto mayor sea dicho valor, más seguro será el sistema controlado.

Se suelen diseñar controladores para que el margen de ganancia sea mayor de 1.7, lo que significa que la razón de amplitudes pueda crecer 1.7 veces antes de producirse la inestabilidad. Si los parámetros son conocidos basta con usar valores entre 1.4 y 1.7. En caso de ser poco conocidos se aconseja usar un margen de 1.7 a 3.

En este trabajo, aunque los parámetros sean conocidos, se exigirá que el margen de ganancia sea mayor que 2, para tener mayor seguridad ante posibles cambios, lo que equivale a 6.0206 dB.

El **margen de fase** indica la fase que se le puede añadir al sistema antes de que se vuelva inestable. Se calcula como los grados que le faltan al sistema para llegar a -180° a la frecuencia de cruce a la cual el diagrama cruza el eje de ganancia 0 dB.

$$\text{Margen de fase} = 180^\circ + \varphi_{\text{sistema}} \quad (2.48)$$

Se recomienda usar un margen de fase entre 45° y 60° . En sistemas de alta incertidumbre se aconseja usar valores cercanos a 60° o incluso superiores.

En este caso se considerará óptimo tener un margen de fase mayor de 60° .

En el caso de la aplicación a varias turbinas se podrán variar los valores límite de margen de fase y de ganancia.

En cuanto al **ancho de banda**, existen varios criterios para su elección. Uno de los más usados suele ser elegir la frecuencia a la cual la ganancia disminuye en 3 dB en el lazo cerrado. Sin embargo, en este trabajo se considerará como ancho de banda la frecuencia de cruce a la cual se obtiene el margen de fase en el lazo abierto, que será algo menor que la calculada de la otra manera, de forma que todos los cálculos se realicen usando el sistema en lazo abierto.

3. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO EN BASE AL MARGEN DE FASE Y LA FRECUENCIA DE CORTE

3.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO

El primer desarrollo de la herramienta consiste en obtener los valores de K_p y T_n de forma analítica, mediante las funciones de margen de fase y de ganancia unitaria a la frecuencia de corte deseada. Como ya se ha comentado en el capítulo 2, las funciones de transferencia sin tener en cuenta el controlador las aporta la herramienta existente en Ingeteam Power Technology.

Se distingue entre el cálculo de parámetros al considerar que únicamente existe la secuencia directa y el cálculo considerando que hay desequilibrios y, por tanto, aparecen tanto la secuencia directa como la inversa:

3.1.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS CON SECUENCIA DIRECTA

En el caso de secuencia directa se fija la frecuencia de corte, y para diferentes valores del margen de fase se obtienen las parejas de K_p y T_n .

Para unos valores de margen de fase y frecuencia de corte dados se van calculando los valores de la constante de proporcionalidad, K_p , y de la constante de tiempo, T_n . En primer lugar, se calcula T_n utilizando el criterio del margen de fase:

$$MF = 180^\circ + Fase_{FT} \quad (3.1)$$

En este caso, la fase de la función de transferencia total será la formada por la fase del PI y la fase del resto de la función de transferencia:

$$MF = 180^\circ + Fase_{PI} + Fase_{FTsinPI} \quad Fase_{PI} = MF - 180^\circ - Fase_{FTsinPI} \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta que el PI está en alpha-beta, y pasando a dominio frecuencial para calcular la fase se obtiene que:

$$PI(s - j\omega) = k_p \cdot \frac{T_n \cdot (s - j\omega) + 1}{T_n \cdot (s - j\omega)} \quad (3.3)$$

$$PI = k_p \cdot \frac{T_n \cdot j(\omega_c - \omega) + 1}{T_n \cdot j(\omega_c - \omega)} \quad (3.4)$$

Donde ω es la pulsación de la red a 50Hz, ω_c es la frecuencia de corte en rad/s y K_p y T_n son los parámetros del controlador.

Usando la ecuación anterior se puede obtener el valor de T_n en primer lugar:

$$Fase_{PI} = \arctg(T_n \cdot (\omega_c - \omega)) - 90^\circ \quad (3.5)$$

$$T_n = \frac{\tan(Fase_{PI} + 90^\circ)}{\omega_c - \omega} \quad (3.6)$$

Y, posteriormente, el valor de K_p , siguiendo el criterio de que la ganancia a la frecuencia de corte sea igual a 1:

$$Módulo_{FTsinPI} \cdot k_p \cdot \frac{\sqrt{(T_n \cdot (\omega_c - \omega))^2 + 1}}{T_n \cdot (\omega_c - \omega)} = 1 \quad (3.7)$$

$$k_p = \frac{1}{Módulo_{PI} \cdot Módulo_{FTsinPI}} \quad (3.8)$$

De esta forma, se consigue calcular los valores de dichos parámetros y visualizarlos gráficamente. Para ello, se representarán, en una misma gráfica, los valores de K_p y de T_n en función del margen de fase.

Para calcular tanto el módulo como la fase de cualquier función de transferencia a la frecuencia deseada se usan las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} &angle(freqresp(FT, \omega_c)) \\ &abs(freqresp(FT, \omega_c)) \end{aligned}$$

Este método es el que se usaba en Ingeteam anteriormente, solamente se hace una pequeña modificación para conseguir el Bode en alpha-beta. A continuación, se explica el proceso a realizar al considerar tanto la secuencia directa como la inversa, y esto también supone un cambio con respecto al método existente.

3.1.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS CON SECUENCIA DIRECTA E INVERSA

Al considerar que se tiene tanto secuencia directa como inversa, el cálculo varía con respecto a lo explicado en el apartado anterior. En este caso, no se puede calcular de la misma forma ya que se tienen dos controladores diferentes que, aunque presenten los mismos parámetros, se comportan de diferente forma al pasar a ejes alpha-beta:

$$LA_{ssec} = FT_{sinPI} \cdot \left(DSC_{dir} \cdot k_p \cdot \frac{T_n \cdot (s - j\omega) + 1}{T_n \cdot (s - j\omega)} + DSC_{inv} \cdot k_p \cdot \frac{T_n \cdot (s + j\omega) + 1}{T_n \cdot (s + j\omega)} \right) \quad (3.9)$$

En este caso, se deben fijar la frecuencia de corte y la constante de tiempo T_n .

Al conocer tanto T_n como la frecuencia de corte se puede calcular la fase de la función, ya que K_p es la única incógnita y no afecta a la fase. Al conocer la fase se conoce el margen de fase, usando la fórmula 3.2.

Para calcular K_p simplemente se obtiene la ganancia de la función sin K_p y se hace su inversa.

La función de transferencia del sistema queda de la siguiente forma:

$$LA_{ssec} = FT_{sinPI} \cdot (DSC_{dir} \cdot PI_{dir} + DSC_{inv} \cdot PI_{inv}) \quad (3.10)$$

La gráfica para cualquiera de los dos casos se observa en la Figura 19.

El código consiste en un bucle en el que varía el valor de la frecuencia de corte para cada iteración. Se comienza con el valor de 250 Hz y se va reduciendo 5 Hz en cada iteración. A continuación, se calculan los valores óptimos del PI y se observa si se cumplen los criterios de estabilidad. En caso de que se cumplan, finaliza el programa y se representa el diagrama de Bode, en caso de que no se cumplan, se sigue iterando.

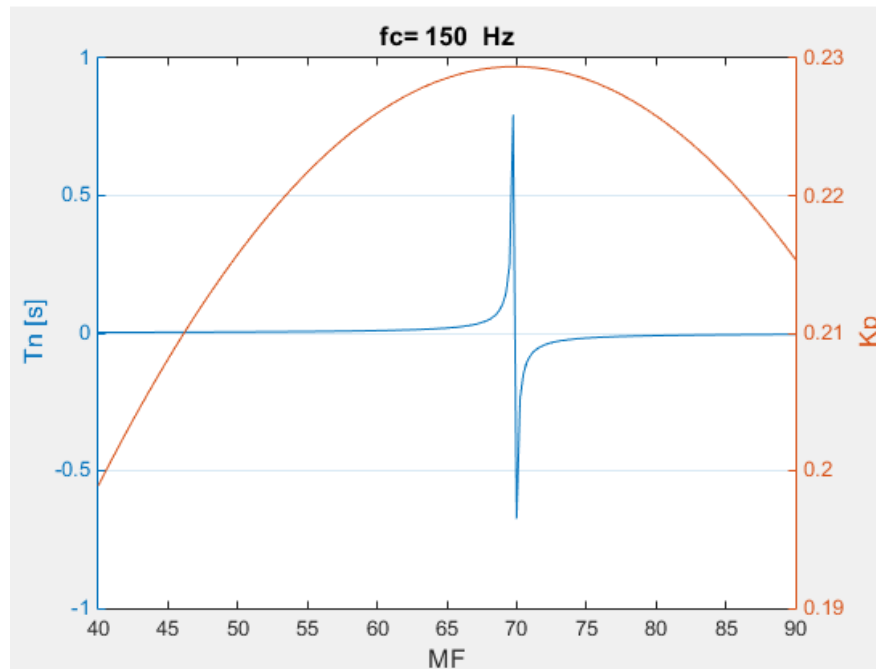


Figura 19. Representación de K_p y T_n frente al margen de fase a una frecuencia de corte concreta

3.1.3 CRITERIO DE SELECCIÓN

En cuanto al criterio de selección, se presta más atención al valor de T_n que al de K_p ya que este último varía muy poco.

En primer lugar, se van a analizar los valores negativos de T_n . Tal y como se observa en la Figura 19, los valores de K_p son parecidos y positivos por lo que, en principio, no tiene sentido utilizar un valor de T_n negativo. Si se usara un valor de T_n negativo se estaría actuando con la acción integral de forma contraria a la acción proporcional. De forma que, si el término proporcional intentase reducir el error, el integral lo iría aumentando, o al revés, de forma que el sistema se haría inestable.

Para comprobar lo que se acaba de explicar, se simula un sistema muy sencillo formado por la planta trifásica, el controlador PI y un retardo de un periodo de control, y se calcula su función de transferencia y los posibles valores de K_p y T_n para una frecuencia de corte de 230 Hz, como ejemplo. El modelo de simulación es el de la Figura 20:

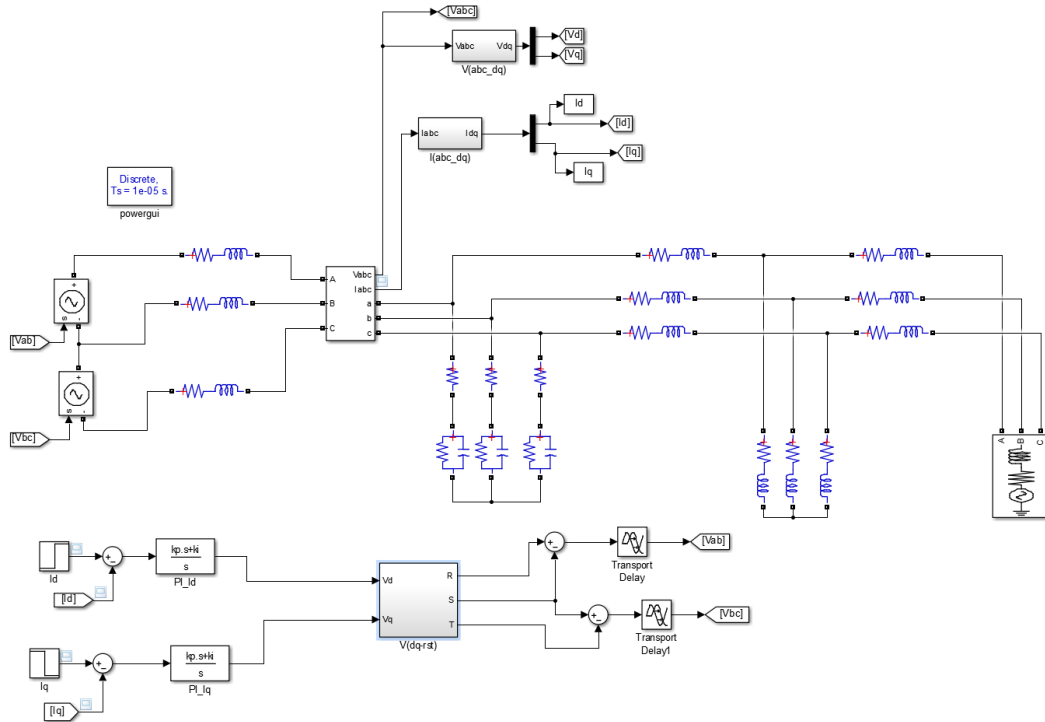


Figura 20. Modelo de simulación formado por la planta, el controlador y el retardo de control

Se calculan las posibles parejas de K_p y T_n que hagan que el sistema sea estable y se eligen dos valores de T_n , uno positivo y otro negativo, para observar con claridad la diferencia entre ambos sistemas:

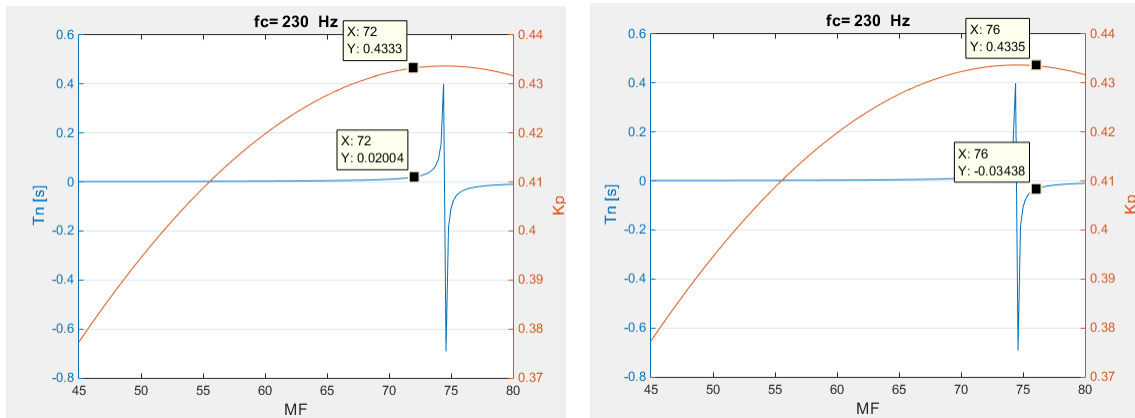


Figura 21. Parejas de parámetros escogidas para T_n positivo (izquierda) y negativo (derecha)

En la Figura 22, se observa, para ambos casos, la intensidad en d junto a la consigna de corriente en dicho eje:

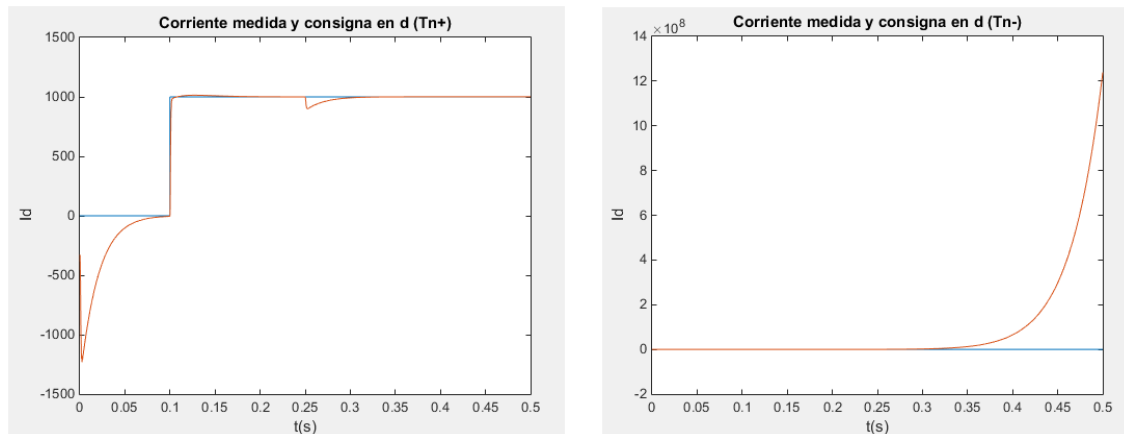


Figura 22. Corriente medida y consigna en d para Tn positivo (izquierda) y negativo (derecha)

Se observa claramente como, para el valor positivo de Tn el sistema es estable y se sigue la referencia de corriente, mientras que en el caso de Tn negativo, el sistema es inestable, a pesar de lo que se obtenga al utilizar el método analítico o con los diagramas de bode. Como consecuencia, los valores negativos de Tn no se considerarán como posibles soluciones.

Dentro de los valores positivos de Tn, los valores menores se descartan, ya que, básicamente, no se cumple el criterio del margen de fase. Para valores mayores el sistema se encuentra en una situación límite y se observa como para pequeñas variaciones del margen de fase el valor de Tn aumenta mucho hasta llegar a un punto en el que se hace negativo, y por tanto, el sistema se hace inestable.

Por todo lo anterior se opta por escoger el valor de Tn correspondiente al codo de la curva, para el cual el margen de fase es prácticamente el máximo posible.

En la Figura 23, se presenta el resultado obtenido al calcular el valor óptimo de Kp y Tn en el caso de separación de secuencias:

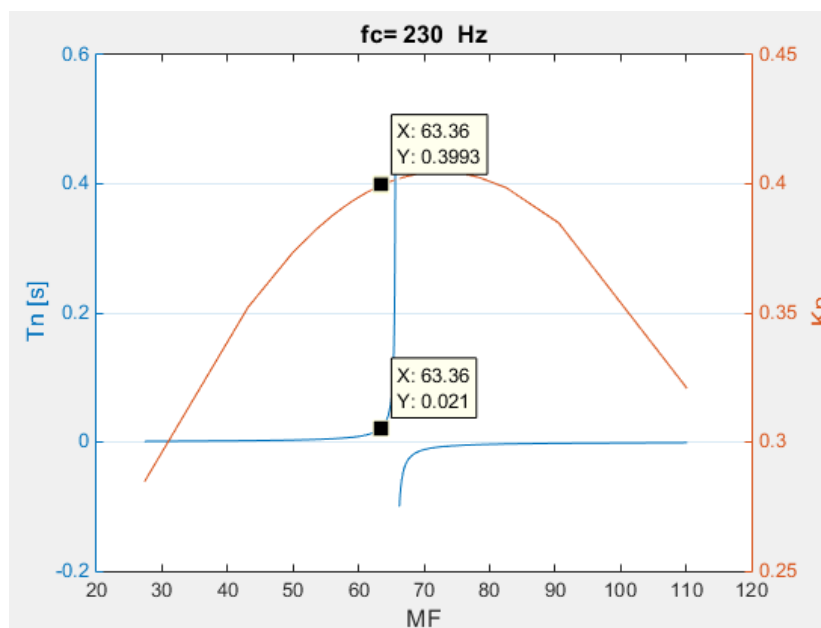


Figura 23. Representación de Kp y Tn óptimos

El diagrama de Bode correspondiente en este caso, en alpha beta, se observa en la Figura 24. Se puede ver como coinciden tanto el margen de fase como la frecuencia de corte con las calculadas:

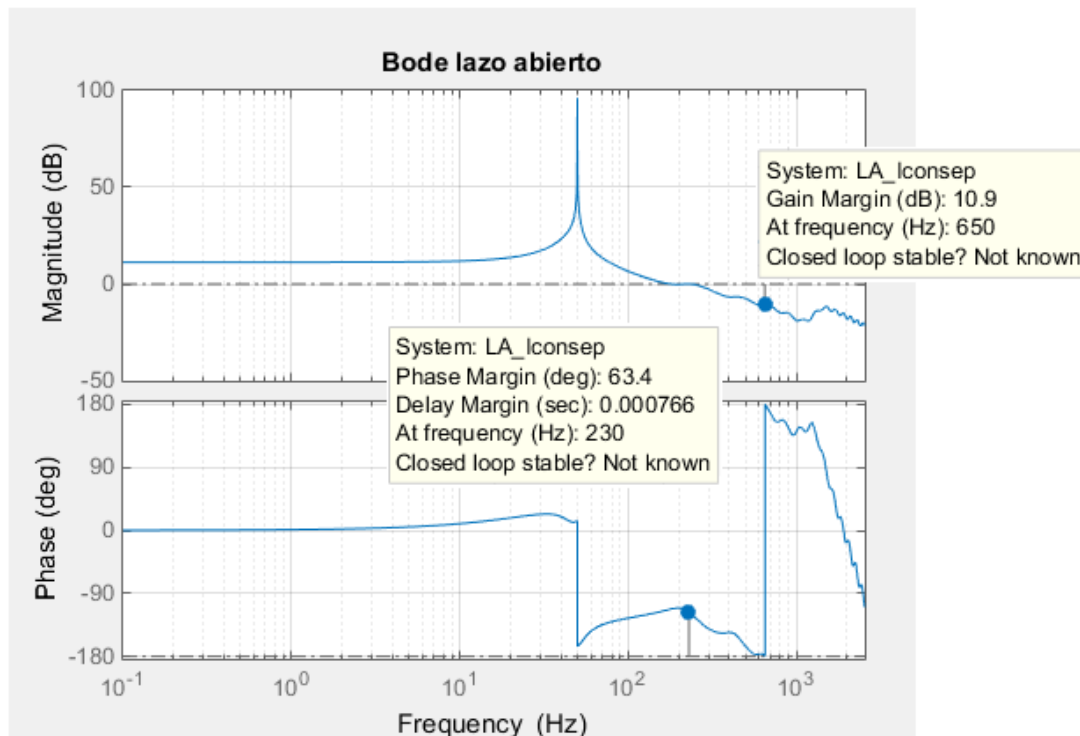


Figura 24. Diagrama de bode del sistema en lazo abierto para los valores de K_p y T_n óptimos.

Tal y como se ha dicho, el diagrama anterior representa la función de transferencia equivalente al sistema en lazo abierto en ejes alpha-beta, para los valores del PI calculados. Antes de seguir viendo más diagramas como este hay que destacar algunas peculiaridades de dicha representación.

Se observa una resonancia a 50 Hz, ya que la ganancia es infinita y la fase experimenta un cambio de 180° . Esto es debido a la transformación del regulador de dq a alpha-beta. De forma que el PI en dq se convierte en un PI resonante en alpha-beta, tal y como se observa en la ecuación 3.11.

$$PI_{\alpha\beta} = K_p + \frac{K_i}{s - j\omega_{red}} = K_p \cdot \frac{T_n \cdot (s - j\omega_{red}) + 1}{T_n \cdot (s - j\omega_{red})} = K_p \cdot \frac{T_n \cdot (j\omega - j\omega_{red}) + 1}{T_n \cdot (j\omega - j\omega_{red})} \quad (3.11)$$

Es necesario aclarar que el cambio de fase que se observa a una frecuencia cercana a los 1000 Hz es simplemente debido a la representación que realiza MATLAB, ya que la fase la representa entre 180° y -180° . De forma que si se representara, por ejemplo, entre 0° y -360° la fase continuaría disminuyendo una vez pasados los -180° .

3.2 PROBLEMA ENCONTRADO-CONCLUSIONES

Aunque, atendiendo al apartado anterior, parece que el método usado es adecuado y fiable, esto no es del todo cierto. Existen situaciones en las que el resultado obtenido al realizar las operaciones explicadas anteriormente no es real.

Esto ocurre, por ejemplo, cuando la resonancia del filtro afecta a la estabilidad del sistema. Es en estas situaciones cuando se producen varios cruces al eje de ganancia y, por tanto, existen varios márgenes de fase. Para los datos utilizados no se tiene este problema, pero cuando se quiera usar la herramienta con otros parámetros, este cálculo podría dar lugar a errores.

3.2.1 SISTEMAS DE CONTROL CON ELEMENTOS RESONANTES

Para estudiar la estabilidad de los sistemas es muy común utilizar el margen de fase obtenido de los diagramas de Bode a la frecuencia de cruce. En muchas situaciones reales este método es suficiente para conseguir buenos resultados. Sin embargo, tiene algunas limitaciones en situaciones más complejas.

En sistemas en los que existen frecuencias de resonancia, como, por ejemplo, en este caso, debido al filtro de armónicos, se pueden producir varios cruces al eje de ganancia (0dB). Estos márgenes de fase extra pueden tener un valor mucho menor que el obtenido a la frecuencia de corte del lazo y, por tanto, pueden llevar a la inestabilidad del sistema. Por ello, se puede concluir que el valor de margen de fase a la frecuencia de cruce ya no representa la estabilidad del sistema.

En las Figura 25 y 26, se muestra una situación en la que se produce dicho problema, utilizando la función de transferencia en la que no se tiene en cuenta la separación de secuencias:

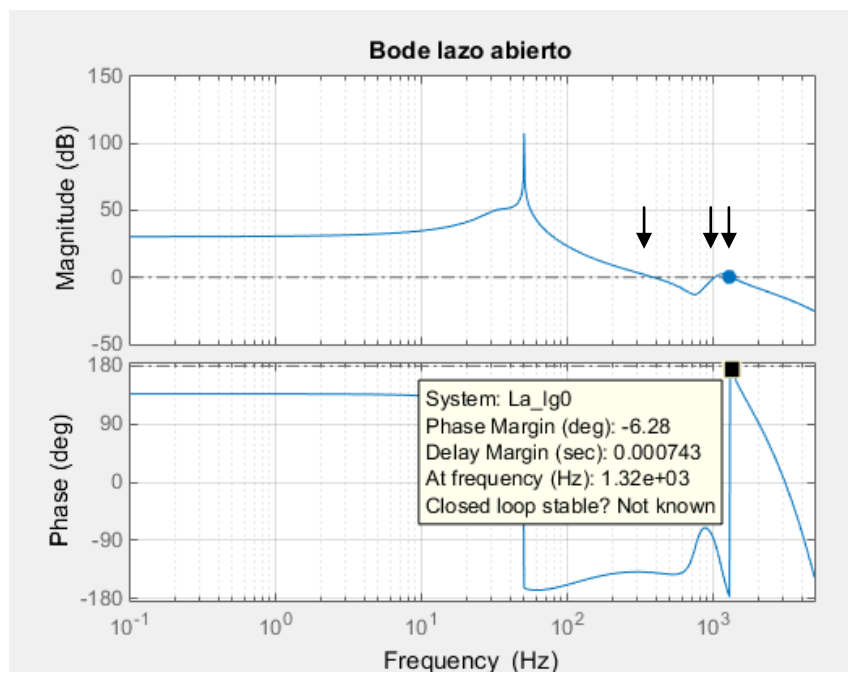


Figura 25. Ejemplo de un sistema con varios puntos de cruce con el eje de ganancia 0

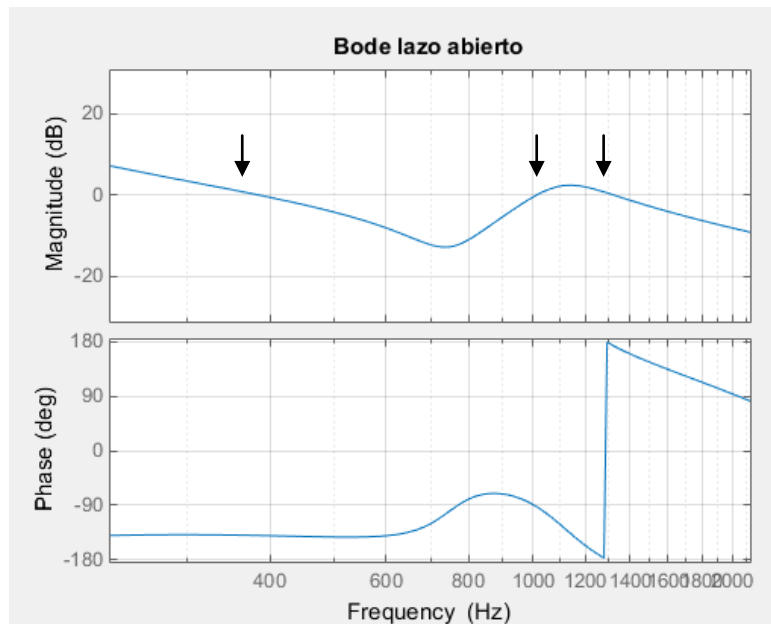


Figura 26. Zoom del diagrama de Bode anterior

En este caso se tienen tres cruces al eje de ganancia, dos de ellos debido a la resonancia del filtro de armónicos. Si se hiciese caso al margen de fase correspondiente al primer cruce se consideraría que el sistema es estable para los parámetros del PI utilizados. Sin embargo, el sistema es inestable, ya que el margen de fase correspondiente al tercer cruce del filtro es negativo y desestabiliza el sistema.

Cuando se producen varias frecuencias de cruce y, por tanto, varios márgenes de fase, el que marca la estabilidad es el menor de ellos.

Para solucionar este problema se puede optar por utilizar diagramas de Nyquist, tal y como se presenta en [GOM11]. Éstos son más adecuados para el análisis de sistemas complejos en los que se producen varios cruces al eje de ganancia. Además, estos diagramas permiten observar la estabilidad de un sistema usando lo que se conoce como función de sensibilidad. Es un método más fiable que el relacionado con los márgenes de fase y de ganancia. Cuanto mayor sea la distancia del diagrama al punto $(-1, j0)$, es decir, cuanto menor sea la función de sensibilidad, mayor será la estabilidad del modelo.

Para observar la diferencia con el diagrama de Bode se representa el sistema con los mismos valores de K_p y T_n con los que se han obtenido las gráficas anteriores. En el diagrama de Nyquist, el margen de fase es el ángulo que forma la recta con el eje x, siendo esta recta la que va desde el origen hasta el punto de cruce de la gráfica con la circunferencia unitaria. Se observa como también hay tres cruces, y los valores del margen de fase y la frecuencia de corte son las mismas que las obtenidas en Bode. La parte superior es simplemente la simetría para frecuencias negativas y esa no se tiene en cuenta:

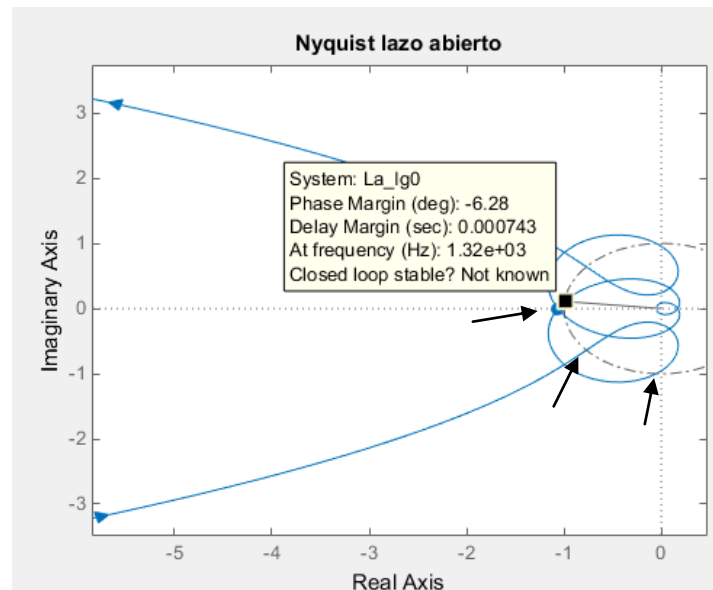


Figura 27. Diagrama de Nyquist de la función en lazo abierto del sistema

Para observar si el modelo es estable o inestable en el diagrama de Nyquist basta con fijarse si la gráfica pasa por la derecha o por la izquierda del punto $(-1, j0)$. Cuando el cruce se realiza por la parte izquierda, el sistema es inestable, ya que el número de vueltas al punto $(-1, j0)$ es positivo y, como dice la teoría, cuando el número de vueltas es positivo el sistema es inestable.

Al usar Nyquist no hay lugar a dudas acerca del margen de fase, ya que no se tiene la situación de incertidumbre anterior. Si lo que interesa es conocer en qué punto el sistema se hace inestable sería más conveniente usar el concepto anterior de la función de sensibilidad.

En este trabajo no se utilizará Nyquist ya que no interesa tanto estudiar los límites de estabilidad, sino que interesa que los parámetros óptimos aporten un margen de fase y un margen de ganancia superior a unos límites determinados. Para ello, se deberá usar el diagrama de Bode y calcular a partir de él los márgenes tanto de ganancia como de fase, ya que éste aporta siempre el menor de ellos en caso de existir varios.

3.2.2 EJEMPLO DEL PROBLEMA Y CONCLUSIÓN

El margen de fase que marca la estabilidad es el menor, y eso se puede observar con claridad en el diagrama de Bode o de Nyquist.

Así, el método realizado sólo es válido si, ante una situación como ésta, el mínimo margen de fase es el del primer corte. Si por el contrario, es el correspondiente a uno de los cortes de mayor frecuencia dicho método deja de ser válido.

Esta breve explicación se observa de forma clara en las gráficas 28 y 29. Según el cálculo, el margen de fase y la frecuencia de corte son, 62.78° y 220 Hz, respectivamente.

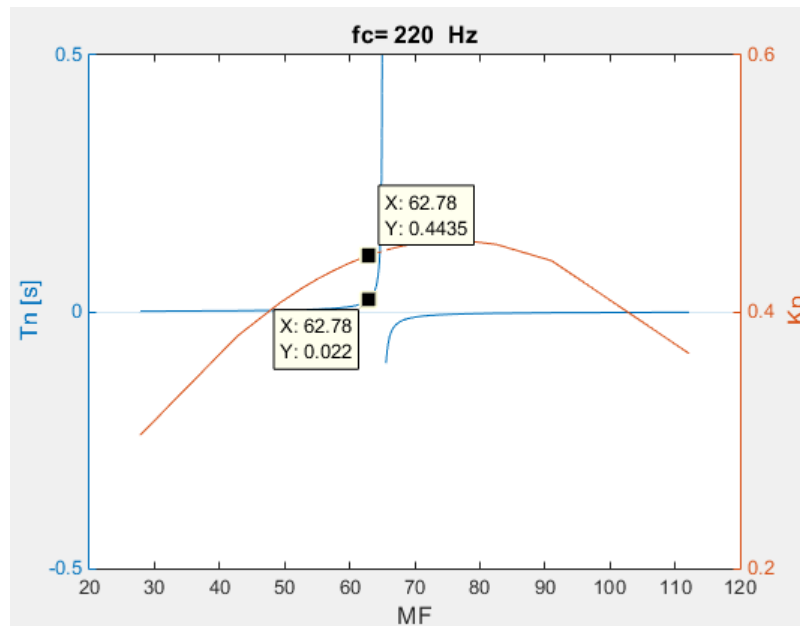


Figura 28. Valores de Kp y Tn para los cuales falla dicho cálculo

Sin embargo, al representar el Bode para esos valores de Kp y Tn se observa que el sistema tiene un margen de fase 10.7° y un margen de ganancia negativo.

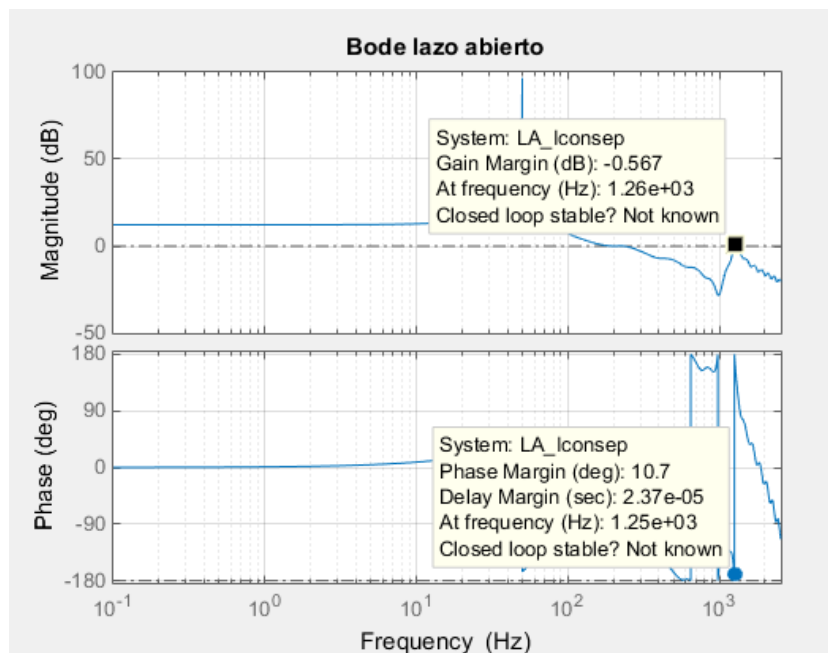


Figura 29. Diagrama de Bode en el que se observan los parámetros de estabilidad reales

Tal y como se observa, en el momento en el que la resonancia afecta a la estabilidad, dicho cálculo pierde validez y, para conocer el margen de fase, se debe usar el diagrama de Bode. Es por ello que este procedimiento analítico se descarta y se desarrolla un segundo método que se explica a continuación.

Este nuevo método estudiará la estabilidad a cualquier frecuencia y no sólo a frecuencias bajas como en el caso anterior.

3.3 VALIDACIÓN DEL PROBLEMA MEDIANTE SIMULACIÓN

Para validar que el método analítico da resultados erróneos en algunas ocasiones, se utiliza un modelo de simulación. Se usa un sistema más sencillo que el utilizado a lo largo del proyecto. La etapa de conversión de potencia es la misma pero el lazo de control será más sencillo. Solamente se considera la existencia de secuencia directa en la red, y el control va a estar únicamente formado por el controlador en ejes alpha beta y un retardo de un periodo de control. El modelo de simulación es el usado para explicar el criterio de elección del valor óptimo y se puede ver en la Figura 20.

Los valores de K_p y T_n obtenidos a través del método analítico son los que se observan en la Figura 30:

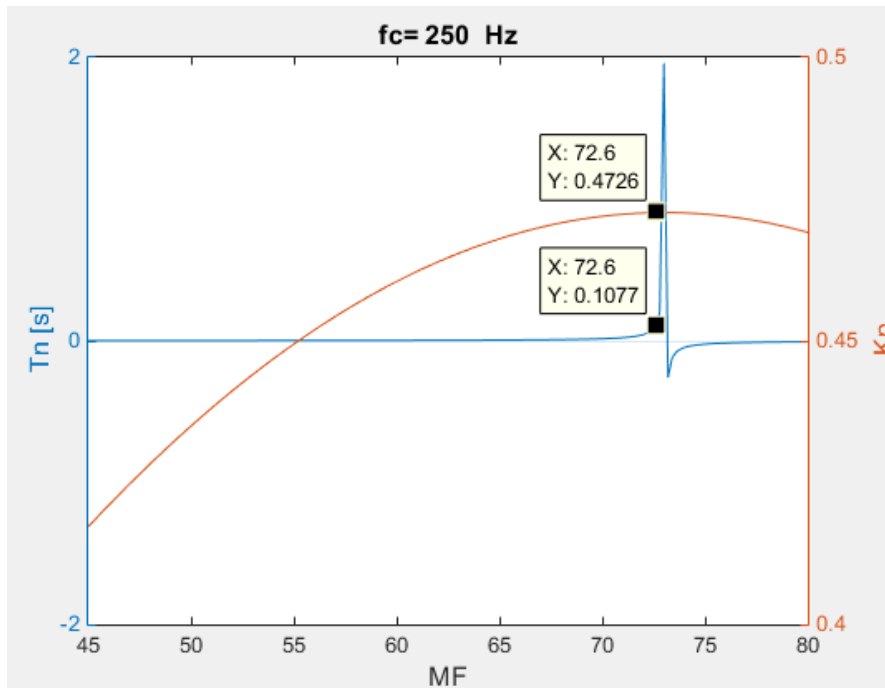


Figura 30. Valores de K_p y T_n obtenidos para la validación del método analítico

Mediante la gráfica anterior se observa como el margen de fase es de 72° y, por tanto, el sistema es estable.

Para comprobar si el método da datos erróneos o no, se se simula en Matlab el modelo ya utilizado anteriormente en el capítulo 3, que se observa en la Figura 20.

En la Figura 31 se representa la consigna de corriente en el eje d así como la corriente medida en dicho eje y se observa como para los valores indicados de K_p y T_n el sistema es inestable. Aunque se puede decir que se encuentra en el límite de estabilidad se descarta el método ya que aún y todo se ve claramente como el sistema no tiene un margen de fase de 72° . Por ello el método queda descartado.

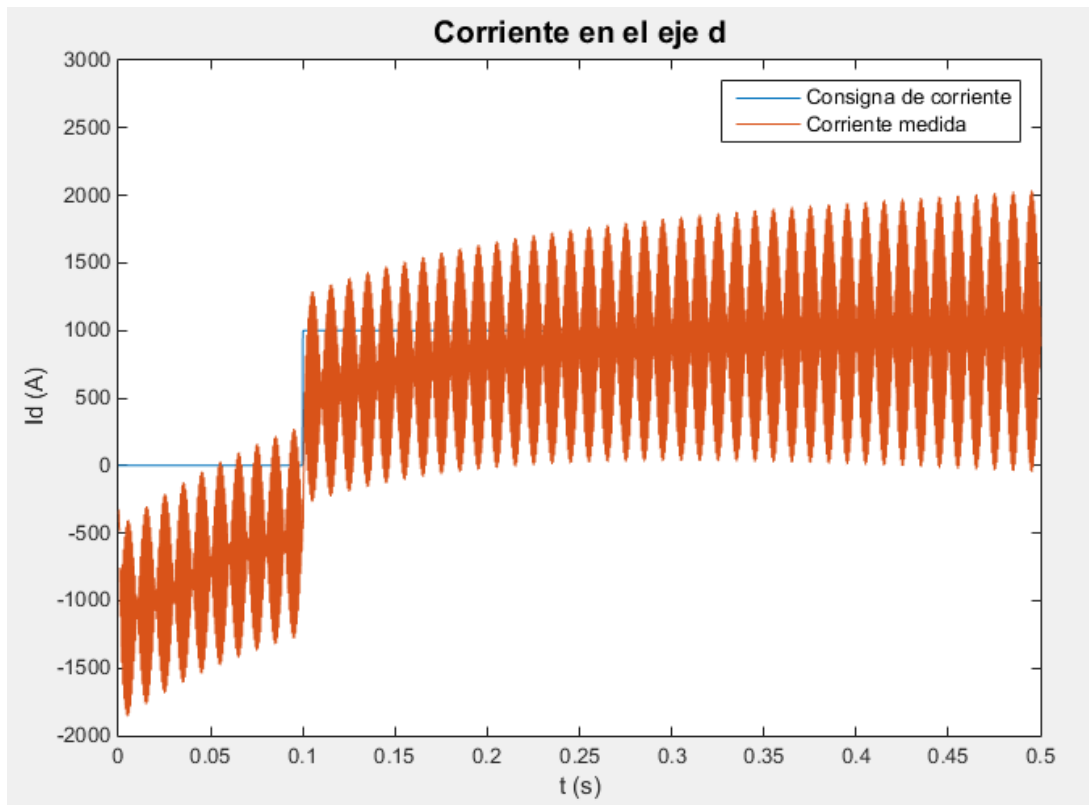


Figura 31. Corriente en el eje d obtenida por simulación

4. IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO ITERATIVO BASADO EN EL ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE BODE

4.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO

Consiste en calcular los parámetros de los controladores pero realizando el cálculo a la inversa. Es decir, conociendo los valores de K_p y T_n , a partir del diagrama de Bode correspondiente, se calculan el margen de fase, el margen de ganancia y la frecuencia de corte del sistema en lazo abierto. Se realiza un barrido de vectores de forma que para cada par de valores de K_p y T_n se realizan los tres procesos siguientes:

- Cálculo de la función de transferencia
- Representación gráfica y obtención de variables
- Criterio de estabilidad

En la Figura 32, se observa con claridad el proceso a realizar, sin tener en cuenta el proceso iterativo que después se explica en detalle. Consiste en calcular los valores de la frecuencia de corte, el margen de fase y el margen de ganancia para cada pareja de K_p y T_n , y posteriormente, comprobar si cumplen el criterio de estabilidad determinado.

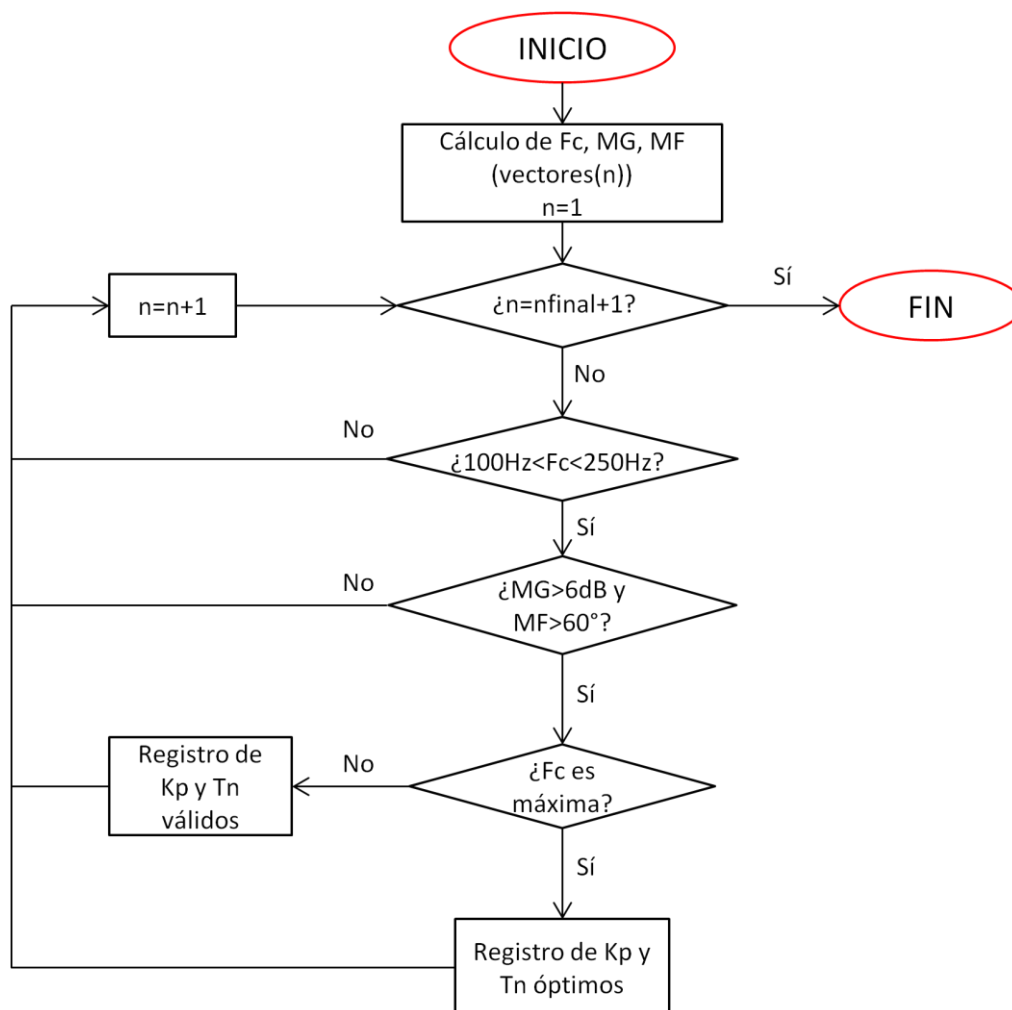


Figura 32. Diagrama de flujo del proceso de registro de valores válidos y óptimos de K_p y T_n

4.1.1 BARRIDO DE Kp Y Tn-DEFINICIÓN DE VECTORES

Una parte muy importante del programa diseñado es el barrido de K_p y T_n . A continuación, se explica en detalle en qué consiste el algoritmo diseñado para ir obteniendo las diferentes combinaciones de dichos parámetros.

En primer lugar, se deben definir los vectores iniciales de K_p y T_n . Como punto de partida para este procedimiento se usan los datos obtenidos en el primer proceso. Para ello, es necesario ponerse en la situación más extrema y observar cuáles son los valores de K_p y T_n . Por eso, lo que se hace es eliminar el filtro de armónicos y observar cuáles son los máximos valores de los parámetros para la frecuencia de corte máxima, 250 Hz. Esta situación nunca se dará puesto que el filtro existe y provocará que el sistema se vuelva inestable antes, por eso se toma como punto de partida. En este caso, la gráfica obtenida es:

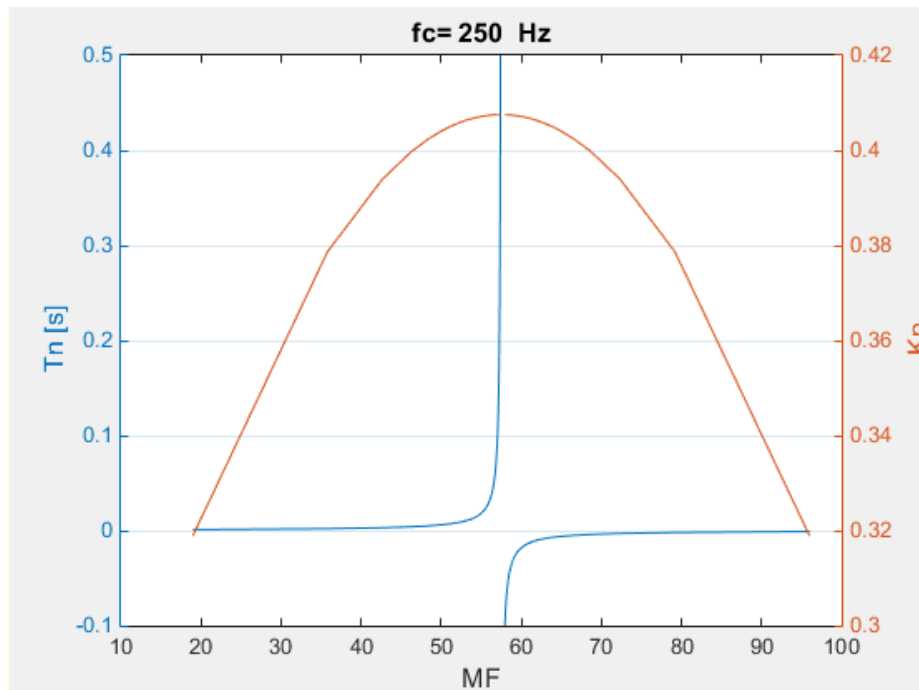


Figura 33. Gráfica para obtener los valores máximos de K_p y T_n

Siendo los valores máximos:

$$K_{p_f} = 0.4075$$

$$T_{n_f} = 0.5$$

Atendiendo a la Figura 31, se puede ver como los valores de K_p no varían mucho pero los de T_n si que experimentan mayor variación, de forma, aproximadamente, exponencial. Es por ello que se decide definir los vectores K_p y T_n de forma diferente: K_p tendrá una escala lineal, mientras que el vector T_n quedará dividido mediante una escala logarítmica.

Así, los vectores iniciales, definidos en Matlab, quedarán de la siguiente forma:

$$K_p = \text{linspace}(0, K_{p_f}, 10)$$

$$T_n = \text{logspace}(\log(0.001), \log(T_{n_f}), 10)$$

Para cada pareja se calculan los valores de margen de fase, margen de ganancia y ancho de banda y se comprueba si hay algún punto que cumpla los criterios de estabilidad, tal y como se explica en la figura 30. Si no hay ningún punto que los cumpla se procederá a aumentar en 10 los puntos en los que se dividen los vectores de K_p y T_n . Este proceso se realizará como máximo 2 veces, de forma que si se supera dicho número el programa avisará por pantalla. Si

algún punto lo cumple, entonces se calculan los valores de K_p y T_n máximos y mínimos que verifican el criterio de estabilidad.

Si solamente hay un punto óptimo, es decir, el valor máximo y mínimo de K_p o de T_n es el mismo, se cogerán como límites el doble y la mitad del vector correspondiente, siempre que no se superen los valores máximos calculados antes de comenzar a iterar. En caso de que se superen, los máximos se convertirán en los últimos valores de los vectores.

Este proceso se realizará mientras los valores óptimos actuales, tanto de K_p como de T_n , se diferencien de los valores óptimos anteriores en más de un 10 % o cuando se trate de la primera iteración, y, por tanto, no se tengan aún valores anteriores.

Cuando la diferencia sea menor, entonces, se realizará la última iteración y se guardarán estos últimos valores como los óptimos. En esa última iteración, además, se reduce el vector de forma que el máximo del mismo será el punto que sea un 25 % mayor que el óptimo y el mínimo el que sea un 25% menor. Tras ello, el programa finalizará.

El algoritmo completo se presenta en la Figura 34 y, será en el apartado de resultados, donde se expliquen paso a paso, con un ejemplo, los resultados que se han ido obteniendo:

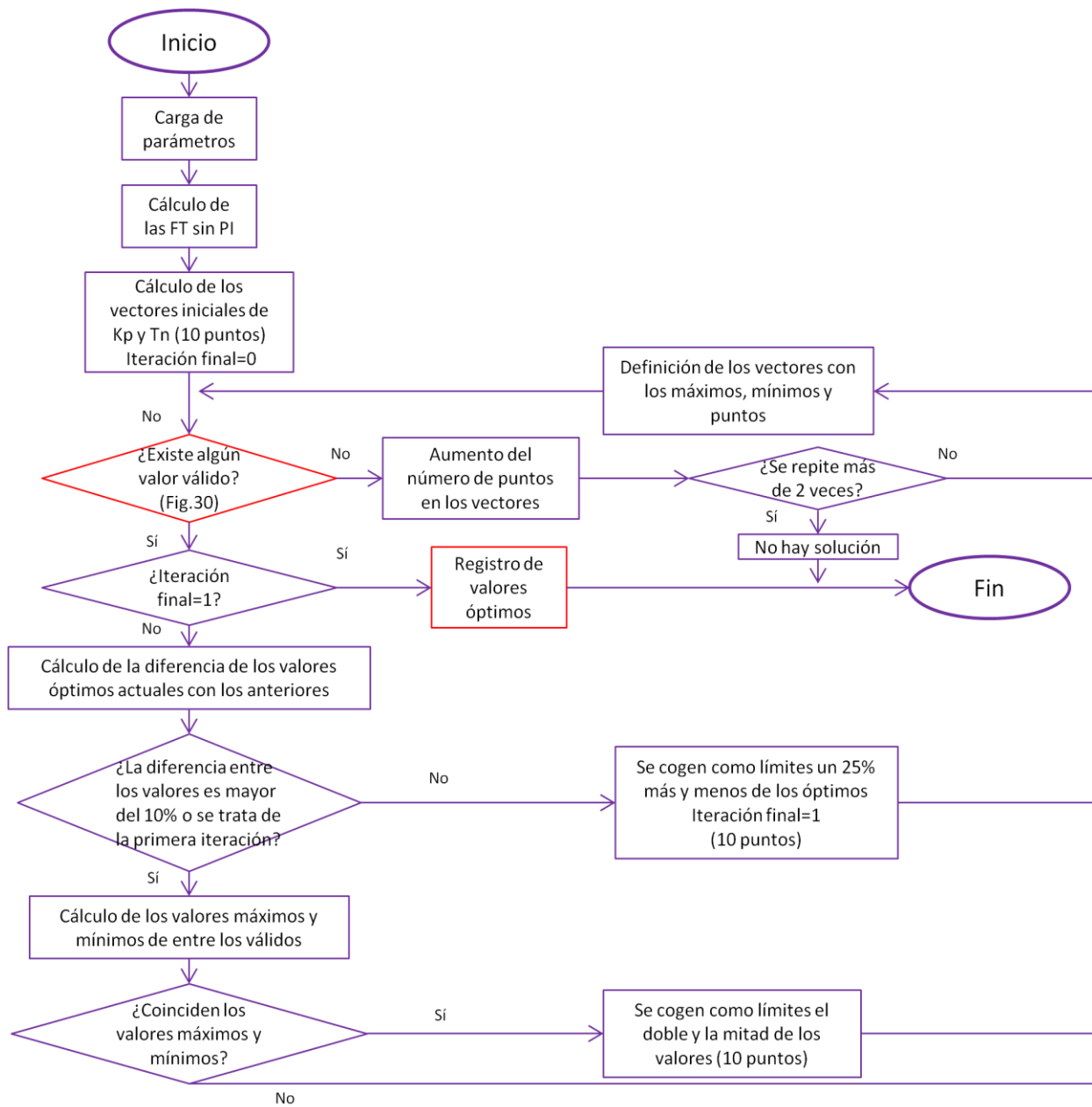


Figura 34. Diagrama de flujo del proceso iterativo de cálculo de Kp y Tn óptimos

4.1.2 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En el caso de la secuencia directa se definen K_p y T_n y se calcula la función de transferencia correspondiente:

$$FT_{LA} = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot (s - j\omega)}\right) \cdot FT_{sinPI} \quad (4.1)$$

Cuando se consideran tanto secuencia directa como inversa la función queda de la siguiente forma (ec. 3.9):

$$FT_{LA} = \left(DSC_{dir} \cdot k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot (s - j\omega)}\right) + DSC_{inv} \cdot k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot (s + j\omega)}\right) \right) \cdot FT_{sinPI}$$

4.1.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y OBTENCIÓN DE VARIABLES

Una vez obtenidas las funciones de transferencia, se calculan mediante el comando *margin* los valores de frecuencia de corte, margen de fase y margen de ganancia. Esta instrucción aporta los valores mínimos de dichos márgenes en caso de que haya varios de ellos.

Al utilizar el diagrama de Bode para calcular dichas variables se evita el problema observado en el primer desarrollo.

4.1.4 CRITERIO DE ESTABILIDAD

Los criterios de estabilidad se han definido en el capítulo del marco teórico. Para dar mayor seguridad ante posibles variaciones en los parámetros se escogen valores mayores como límite. Por tanto, para que los valores de K_p y T_n se consideren adecuados se debe cumplir que:

$$MFase > 60^\circ$$

$$MGanancia > 6 \text{ dB}$$

$$100 \text{ Hz} < Fcorte < 250 \text{ Hz}$$

En sistemas de gran potencia el ancho de banda suele estar entre 100Hz y 250 Hz porque las frecuencias de conmutación son relativamente bajas, por ello, también es menor la frecuencia de resonancia del filtro de red y esto limita el ancho de banda que puede tener el sistema. Será este intervalo el que se escoja como criterio de frecuencia de corte.

Con esas tres consideraciones se consigue delimitar los valores de los parámetros posibles. Para la elección de los valores óptimos se considera como criterio de elección elegir los valores para los que el ancho de banda sea el mayor posible.

Este criterio de estabilidad solamente se usará en los cálculos para una sola turbina. Cuando se trate de conectar en paralelo varias de ellas, se podrá establecer el criterio antes de realizar el cálculo.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

4.2.1 BARRIDO KP Y Tn

A continuación, se explica de forma detallada, gráficamente y numéricamente, los resultados obtenidos al ir realizando las iteraciones del caso en el que se tienen tanto secuencia directa como inversa.

Se comienza con los siguientes vectores:

$$Kp = \text{linspace}(0.001, 0.4075, 10)$$

$$Tn = \text{logspace}(\log 0.001, \log 0.5, 10)$$

Se pueden observar los resultados obtenidos en tres gráficas, en las que se representan el margen de fase, el margen de ganancia y el ancho de banda, para una Kp y una Tn determinadas:

- En la gráfica del margen de fase, Figura 35, se observa como los valores varían entre -20° y 70° , aproximadamente, siendo éste mayor cuanto menor es Kp y mayor es Tn .

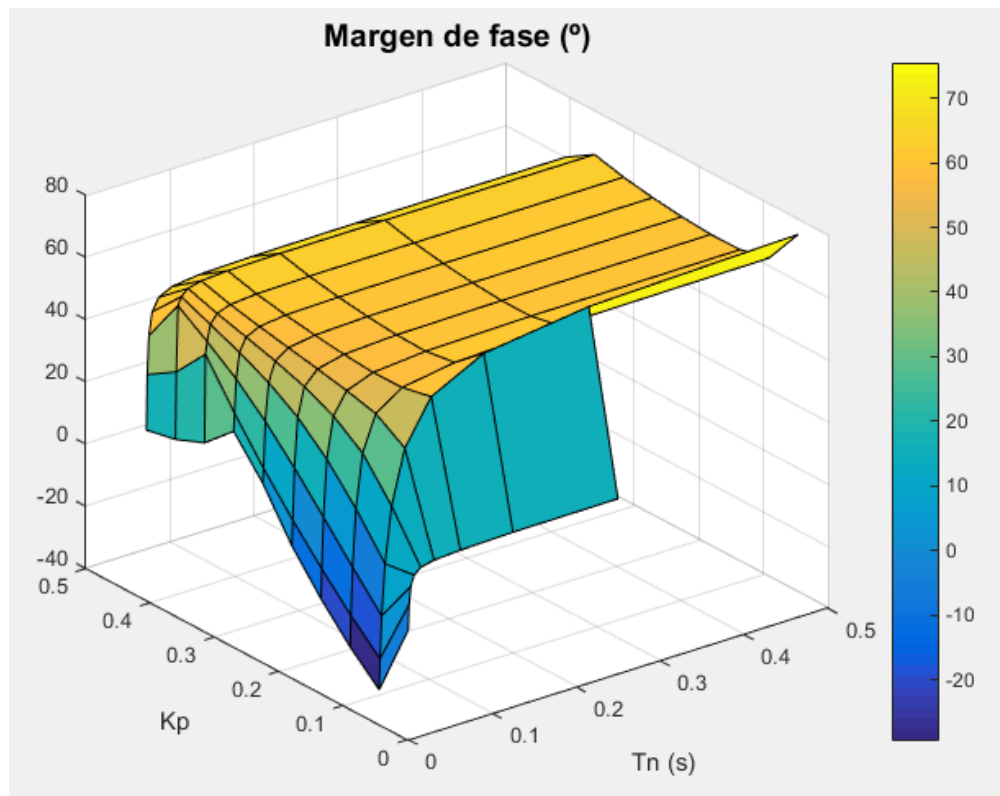


Figura 35. Margen de fase en función de los valores de Kp y Tn .

- En la gráfica del margen de ganancia, Figura 36, se observa que su valor también es mayor cuanto menor es el valor de Kp . Aunque también es cierto que la mayoría de los valores se mueven entre 10 y 60 dB, siendo 10 ya lo suficientemente alto para garantizar la estabilidad.

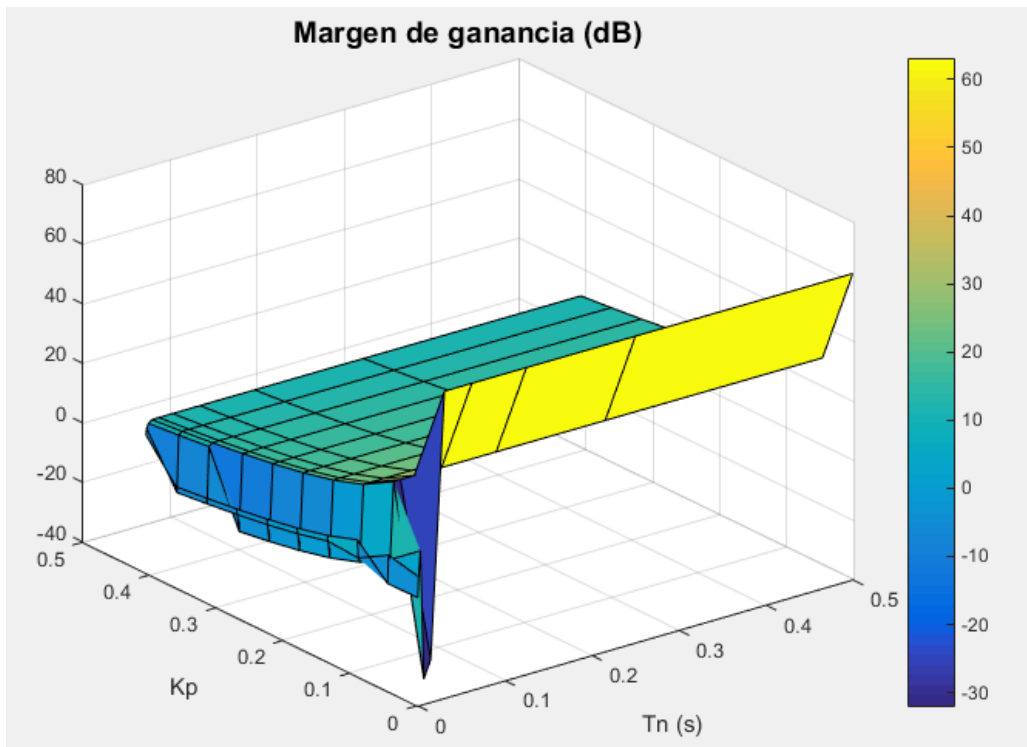


Figura 36. Margen de ganancia en función de los valores de K_p y T_n .

- En la Figura 37, se ve como la tendencia es la contraria, la frecuencia de corte aumenta conforme mayor es el valor de K_p , estando sus valores comprendidos entre 50 y 250 Hz, por lo que los menores de 100 Hz no son deseables:

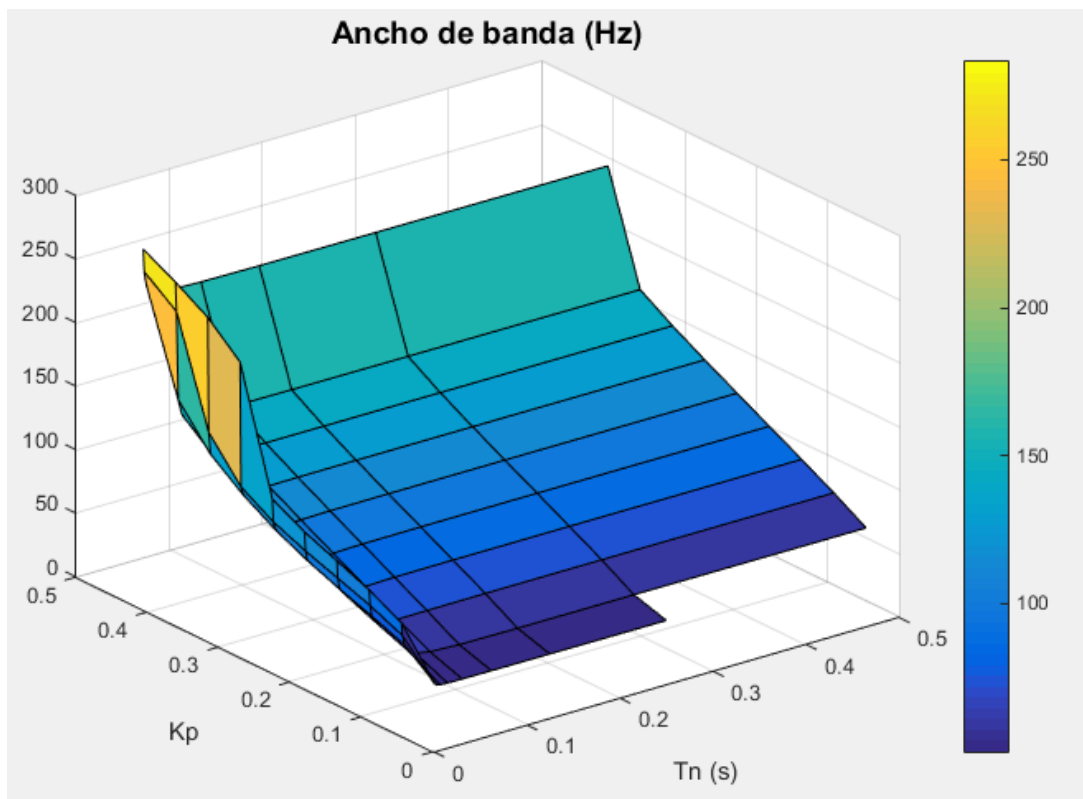


Figura 37. Ancho de banda en función de los valores de K_p y T_n .

A continuación, en la Figura 38, se representan los valores de K_p y T_n que cumplen los tres criterios establecidos. Se representa el ancho de banda ya que es la característica que decidirá, en último lugar, los valores óptimos de los parámetros. Para que se vea de forma más clara, se ponen a 0 todos los valores para los que no se cumplen los criterios fijados. Se observa como la gráfica es similar a la anterior pero eliminando los puntos con menor K_p y con menor T_n :

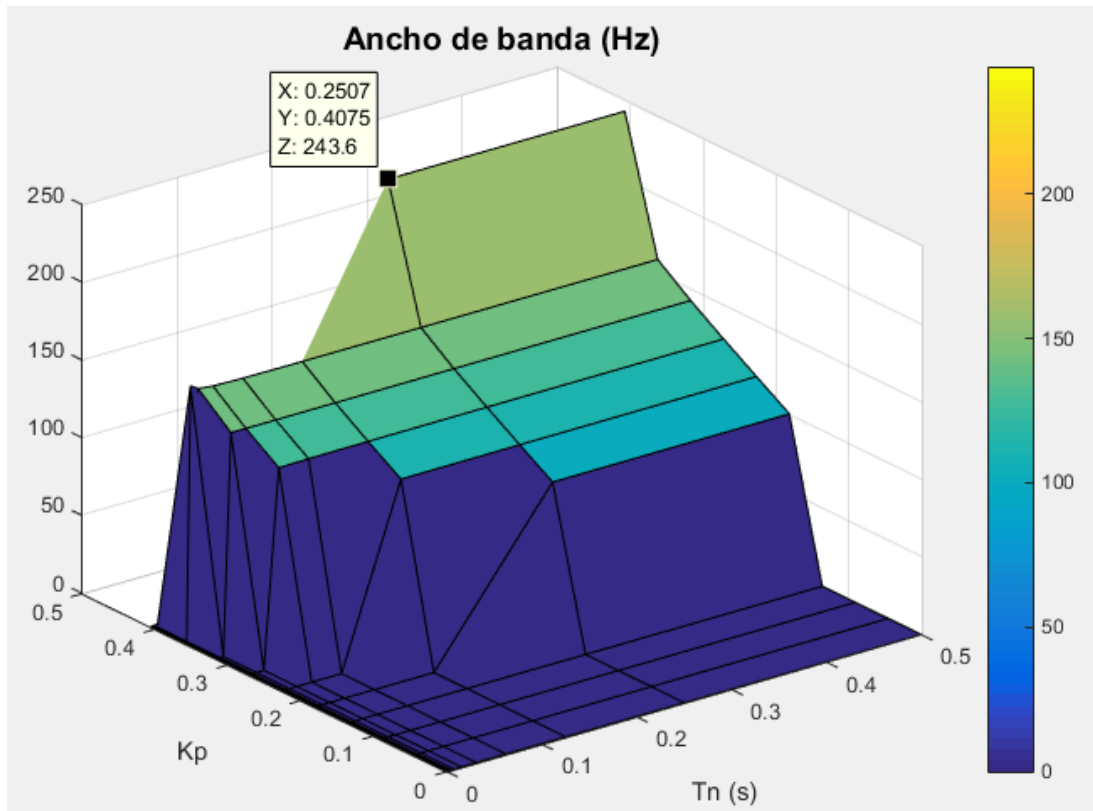


Figura 38. Ancho de banda en función de los valores de K_p y T_n válidos

En todas las gráficas se observa con claridad que el vector de K_p tiene escala lineal mientras que el vector T_n tiene escala logarítmica, tal y como se ha explicado.

Se observa que existen varios puntos que cumplen los criterios, siendo el que tiene más ancho de banda el indicado en la Figura 38. A continuación, se acota un poco más, modificando los vectores, fijando sus valores a los valores, máximo y mínimo, de K_p y T_n que cumplen las especificaciones:

$$K_p = \text{linspace}(0.1817, 0.4075, 10)$$

$$T_n = \text{logspace}(\log 0.0079, \log 0.5, 10)$$

El resultado en este caso es el siguiente:

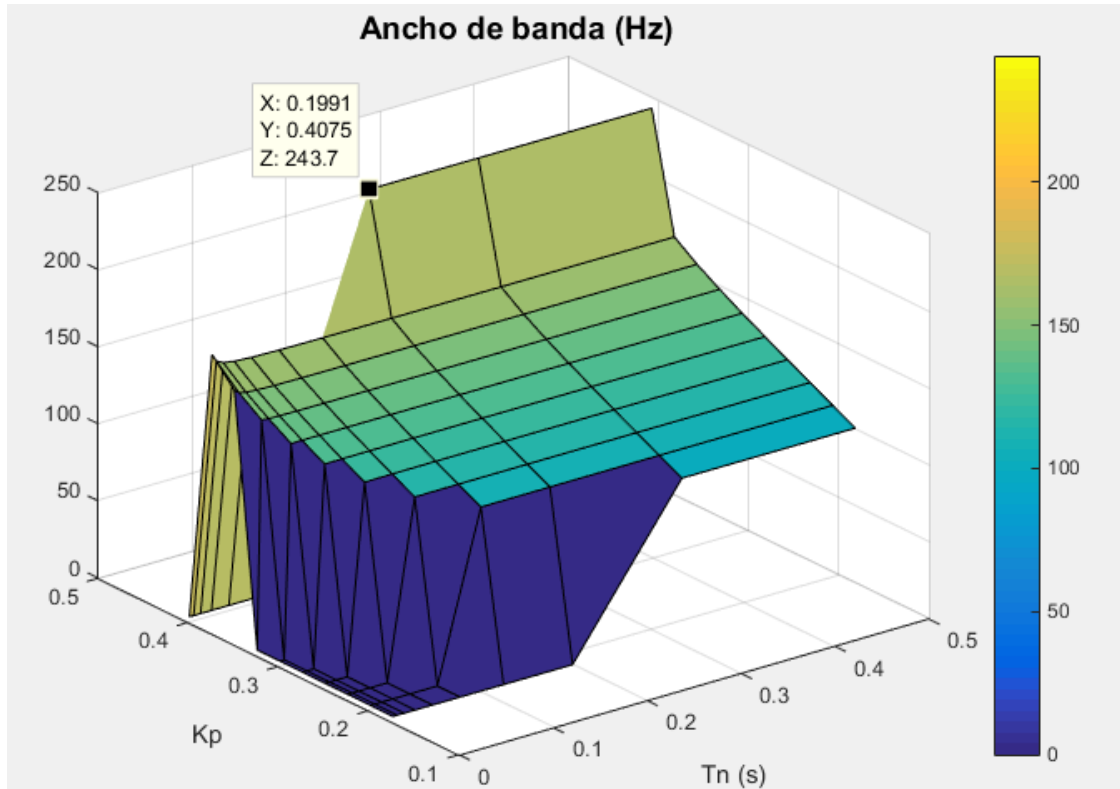


Figura 39. Ancho de banda en función de los valores de K_p y T_n válidos (1)

Se observa como el valor óptimo de K_p es el mismo pero el de T_n se diferencia en más de un 10% por lo que se vuelve a iterar. Los vectores que se usan coinciden con los anteriores:

$$K_p = \text{linspace}(0.1817, 0.4075, 10)$$

$$T_n = \text{logspace}(\log 0.0079, \log 0.5, 10)$$

Al usar los mismos vectores se obtienen los mismos resultados, de forma que ahora sí que coinciden tanto los valores de K_p como de T_n , de forma que se va a realizar la última iteración. Los vectores definidos para la última iteración tienen 20 puntos entre el máximo y el mínimo, y los límites son aquellos valores que suponen un 25% más y menos de los valores óptimos obtenidos:

$$K_p = \text{linspace}(0.3056, 0.4075, 10)$$

$$T_n = \text{logspace}(\log 0.1493, \log 0.2489, 10)$$

El resultado obtenido para esos últimos vectores es el siguiente:

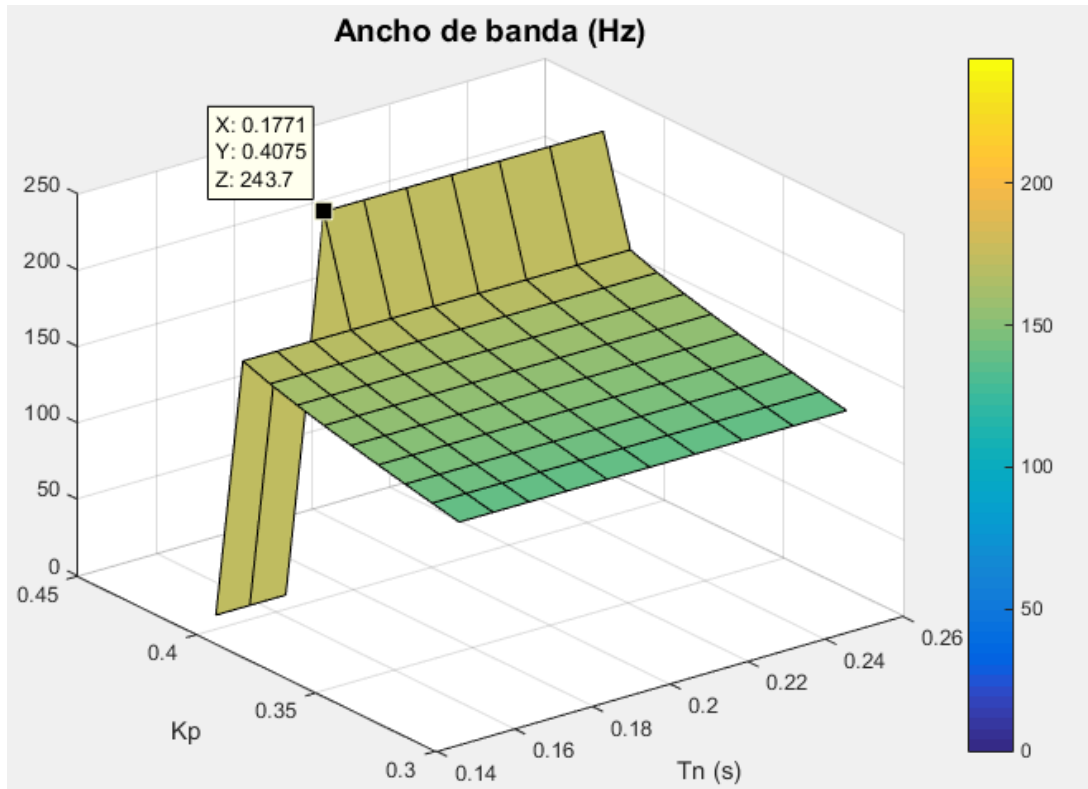


Figura 40. Valor del ancho de banda para cada pareja de K_p y T_n válidos(2)

Al ser la última iteración, se considera que los valores de K_p y T_n indicados son los óptimos, para los cuales el sistema cumple los criterios de estabilidad y además se tiene el mayor ancho de banda posible.

4.2.2 CASO DE SECUENCIA DIRECTA

En este caso, los valores óptimos, de los parámetros del controlador, son:

$$K_p = 0.362$$

$$T_n = 0.0387s$$

Para esos valores de K_p y T_n , a partir del diagrama de Bode, se obtienen:

$$MF = 60.15^\circ \quad MG = 11.79 \text{ dB}$$

$$f_{corte} = 224.5 \text{ Hz}$$

El diagrama de Bode correspondiente es el que se observa en la Figura 41:

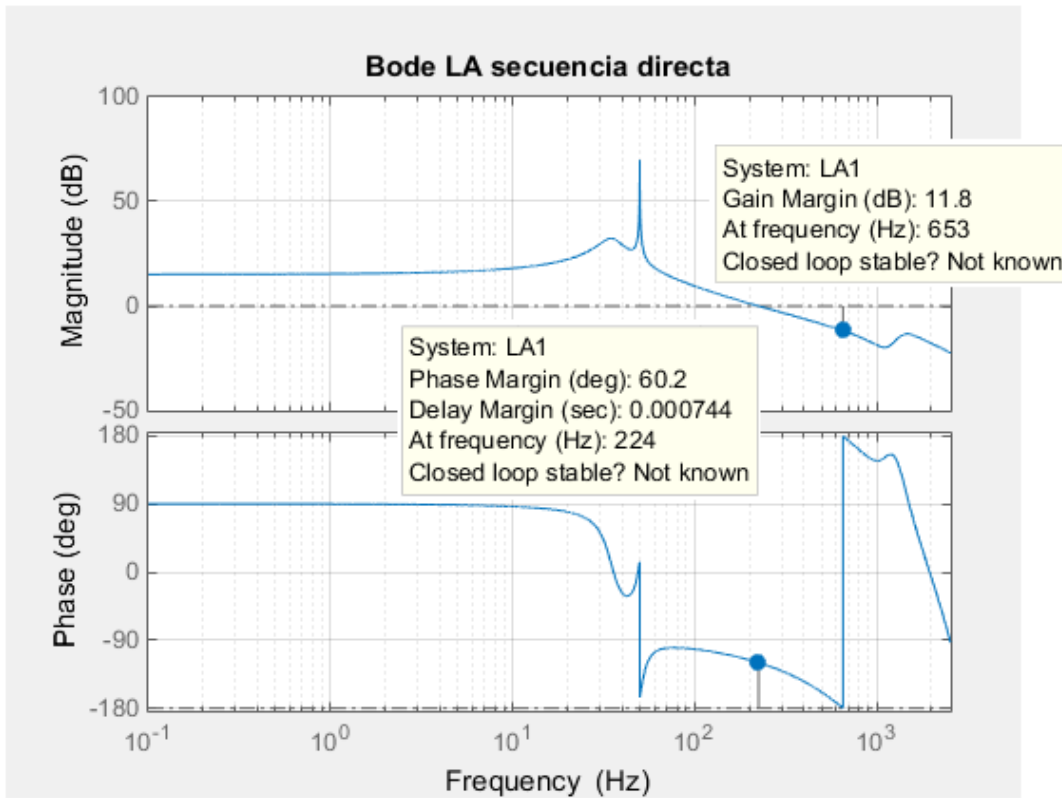


Figura 41. Diagrama de Bode del lazo abierto- secuencia directa

En el diagrama anterior se observa como los valores conseguidos mediante el barrido se corresponden con los del diagrama de bode, lógicamente.

El diagrama de Bode del lazo cerrado queda de la siguiente forma:

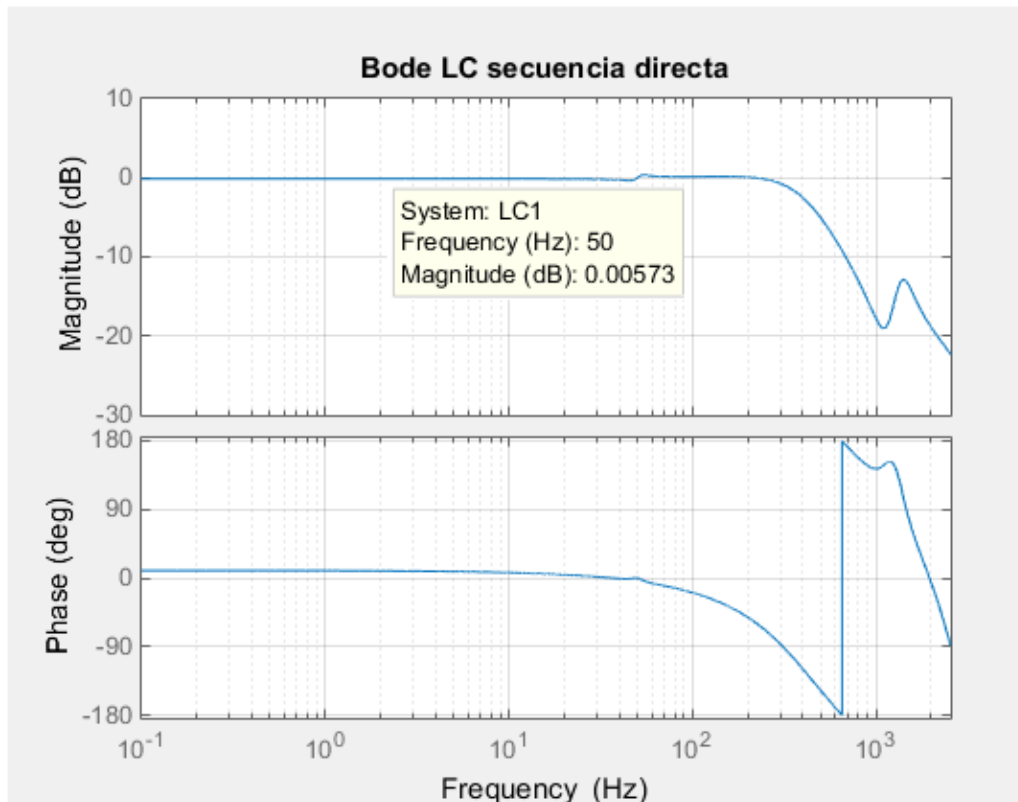


Figura 42. Diagrama de Bode del lazo cerrado-secuencia directa

En el diagrama de bode del lazo cerrado se observa como la resonancia desaparece y en ese punto, a 50 Hz, se tiene ganancia unidad, lo que indica que a esa frecuencia el sistema se controla perfectamente.

4.2.3 CASO DE SECUENCIA DIRECTA E INVERSA

El caso de separación de secuencias es el que se ha usado para explicar las iteraciones realizadas, de forma que los valores óptimos, de los parámetros del controlador, son:

$$Kp = 0.4075$$

$$Tn = 0.1708 \text{ s}$$

Para esos valores de Kp y Tn , a partir del diagrama de Bode, se obtienen:

$$MF = 60$$

$$MG = 10.7 \text{ dB}$$

$$f_{\text{corte}} = 244 \text{ Hz}$$

El diagrama de Bode correspondiente, tanto para la secuencia directa como inversa se observa en la Figura 43:

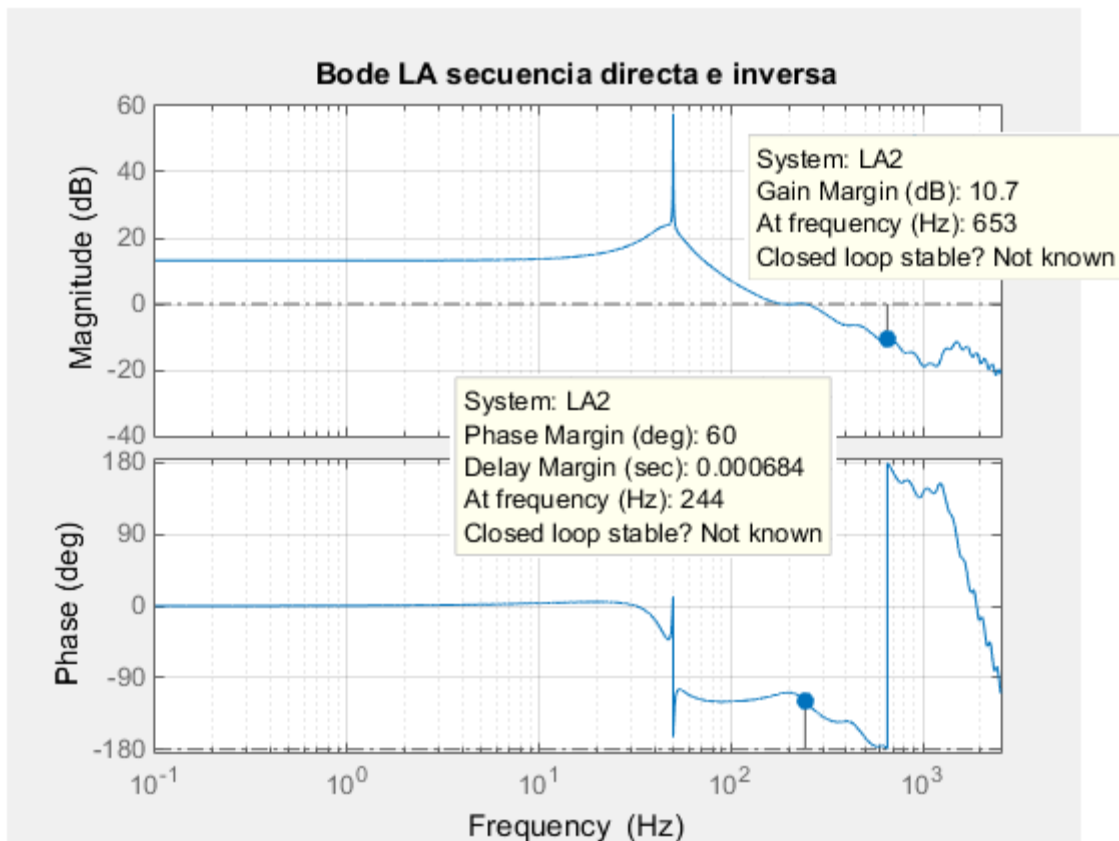


Figura 43. Diagrama de Bode del lazo abierto-secuencia directa

En este caso, al igual que para el sistema en el que únicamente se considera la secuencia directa, los resultados obtenidos coinciden con los visualizados en la gráfica.

El diagrama de Bode del lazo cerrado queda de la siguiente forma:

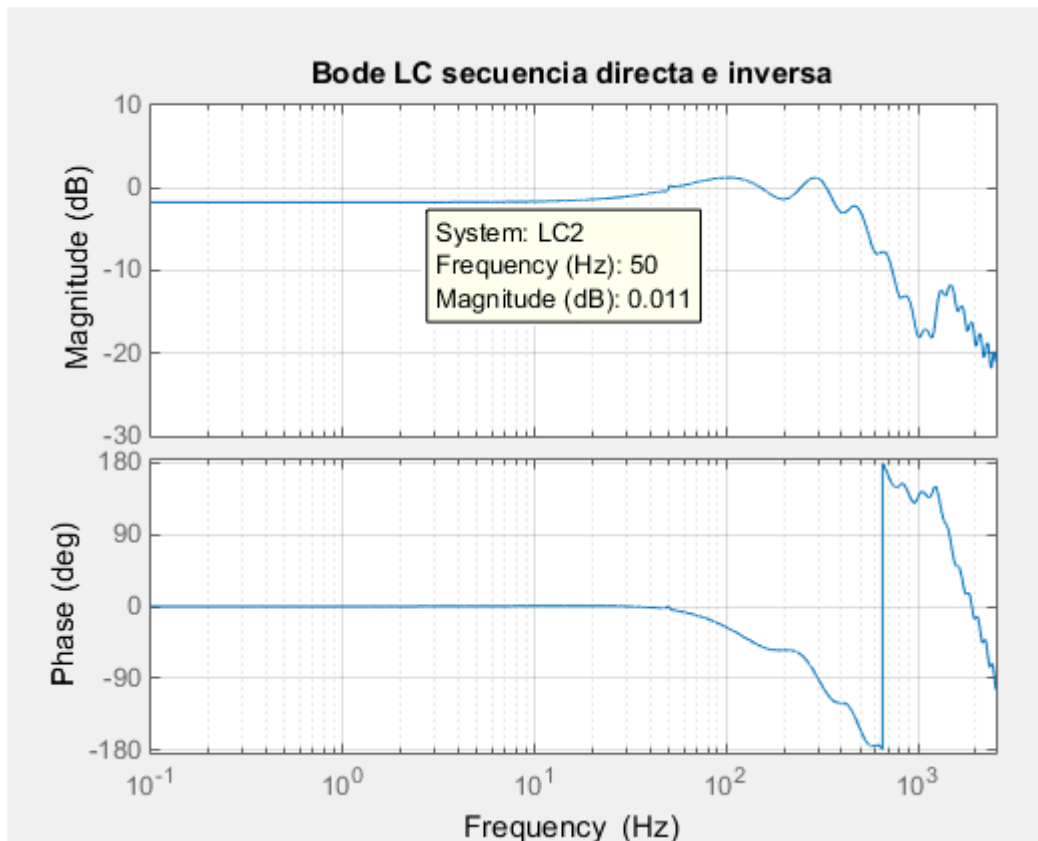


Figura 44. Diagrama de Bode del lazo cerrado,-secuencia directa e inversa.

Se verifica de nuevo que la ganancia es unitaria a 50 Hz por lo que el control a esa frecuencia es el deseado.

Al considerar, en este caso, también la secuencia inversa, el control empeora un poco con respecto al control de la secuencia directa únicamente. Esto es muy común al incluir la secuencia inversa en cualquier sistema.

4.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE SIMULACIÓN

Al igual que se ha realizado para el método analítico, se va a proceder a validar el método iterativo mediante simulación, usando el mismo modelo que en el caso anterior, el de la Figura 20.

En este caso, el resultado que aporta la herramienta, usando los mismos parámetros de simulación es el siguiente:

$$k_p = 0.1802$$

$$t_n = 0.0017$$

Se observa como los valores son muy distintos de los aportados por el otro método y se procede a validar el resultado mediante simulación, visualizándolo en la Figura 45:

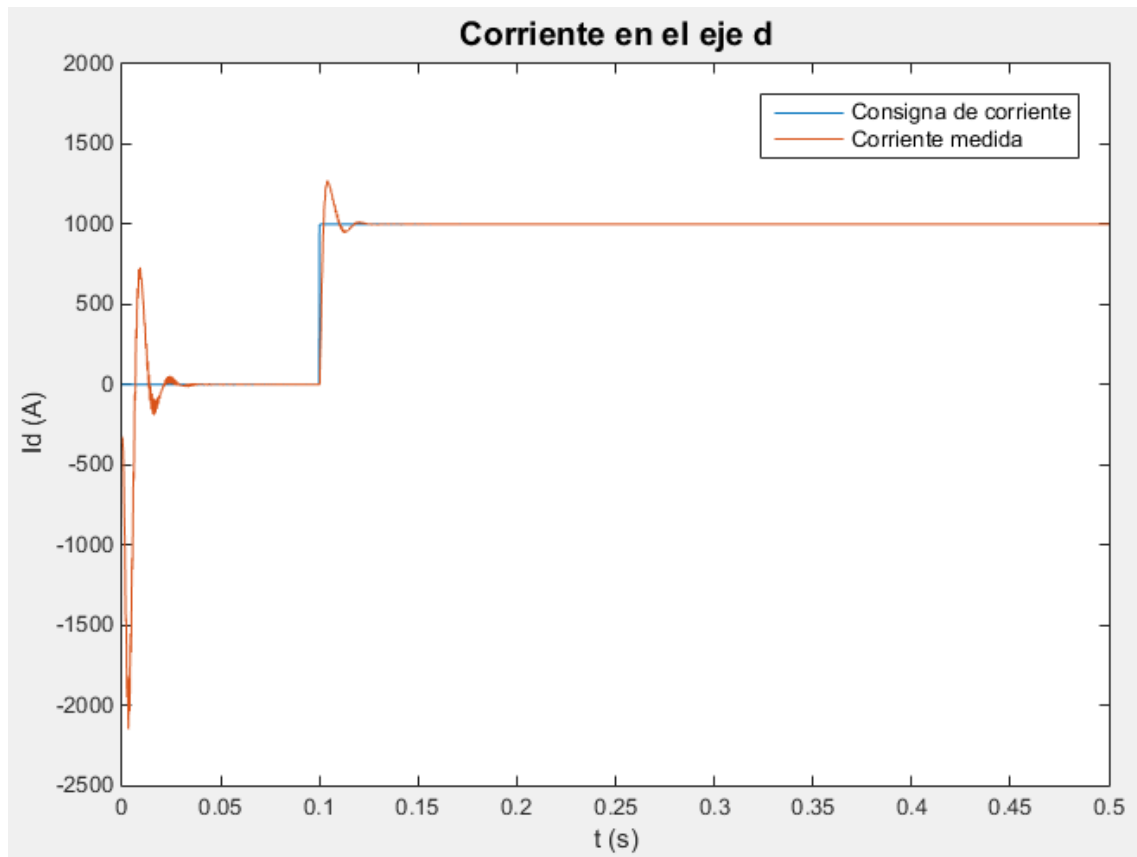


Figura 45. Corriente en d obtenida al considerar los parámetros calculados con el método iterativo

Tras observar que el sistema es estable queda validada dicha herramienta mediante simulación.

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO ITERATIVO A VARIAS TURBINAS

5.1 MODELOS EQUIVALENTES DEBIDO A LAS DIFERENTES CORRIENTES EXISTENTES

Para aplicar la herramienta a varios convertidores, primero se debe estudiar cuál va a ser el cambio a realizar para que, en lugar de estar calculando el Bode de una sola turbina, se calcule el Bode del conjunto.

Se quieren conectar en paralelo varias turbinas eólicas, es decir, los convertidores se deben conectar de forma que todos los aerogeneradores se conecten a la misma red.

Para comprender en qué consiste dicha conexión se deben conocer, en primer lugar, las corrientes que circulan por los convertidores [JUA14]. Se distinguen tres tipos de corrientes que conforman la corriente total de salida del sistema:

- Corriente normal: Se trata de la componente que se vierte a red.
- Corriente cruzada diferencial: Componente de corriente que se cierra a través de los convertidores conectados a la misma red.
- Corriente cruzada homopolar: Componente que se cierra a través del total de convertidores, tanto GSC como MSC. En este caso, no se tendrá en cuenta ya que los convertidores de lado máquina no se conectan al mismo generador, sino que cada uno es independiente de los otros, por lo que no existe un camino por el que circule dicha componente.

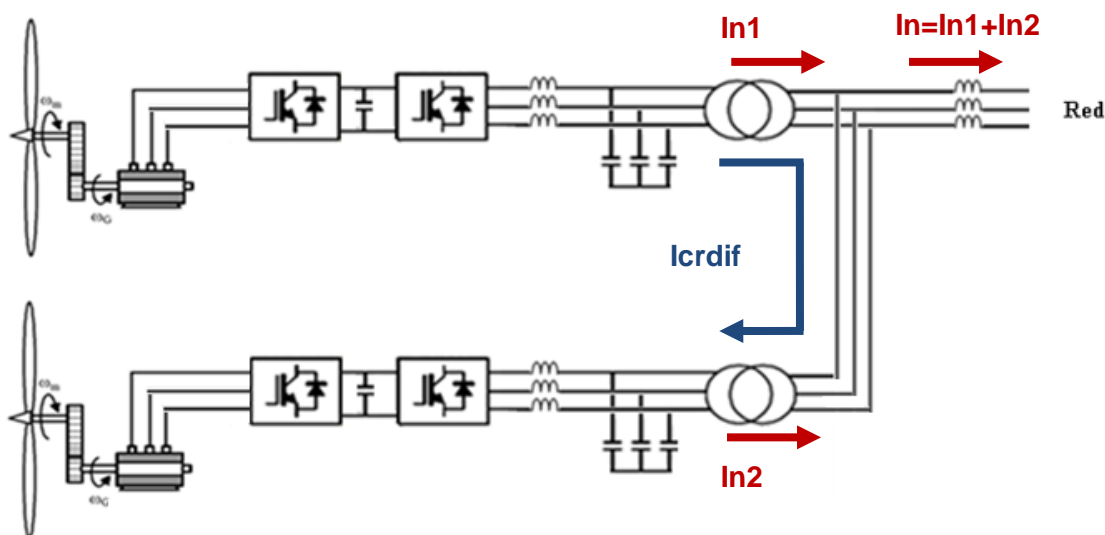


Figura 46. Corrientes normales y corriente cruzada diferencial de un sistema formado por dos turbinas en paralelo

Para que el sistema sea estable es condición necesaria que, tanto el lazo formado por el regulador PI y el modelo de corriente normal, como el lazo compuesto por el controlador y el modelo de corriente cruzada diferencial, sean estables.

Puede darse el caso de que el modelo de corriente cruzada diferencial limite más la dinámica del regulador porque se haga inestable antes y el diseño del regulador varíe.

Por lo tanto, se deberá comprobar que ambos sistemas sean estables para los valores de K_p y T_n escogidos. La interacción de una turbina con red, al tener conectadas, en paralelo, varias turbinas, se puede estudiar atendiendo a la corriente normal, y la interacción entre turbinas se observa en la estudio de la corriente cruzada diferencial.

Para estudiar la estabilidad de ambos lazos se debe hacer la equivalencia de cada modelo con el modelo unifilar que se usará en la herramienta.

Al considerar el modelo de corriente normal se observa como la intensidad que circula a red es la suma de las corrientes normales de todos los convertidores. De forma que cuando se conectan n turbinas a red, la caída de tensión en la impedancia de red es:

$$V_{Zred} = Z_{red} \cdot (I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nn}) = Z_{red} \cdot I_{n1} \cdot n \quad (5.1)$$

El modelo monofásico equivalente es aquel en el que la impedancia de red se ve multiplicada por el número de turbinas conectadas, de forma que la caída de tensión en la inductancia sea la misma que en el modelo trifásico con n turbinas. El modelo se observa en la Figura 47:

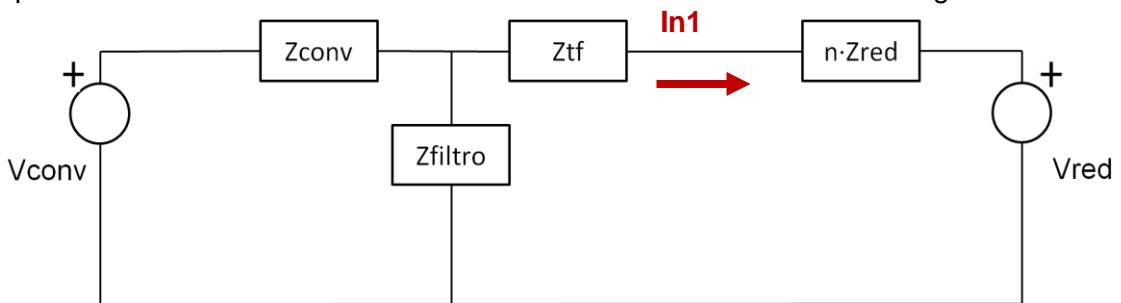


Figura 47. Modelo unifilar equivalente para la corriente normal

El modelo anterior considera que las turbinas vierten a red la misma potencia, y por tanto, la intensidad es la misma, pero eso no sucede siempre. Cuando existen diferencias entre la potencia que las turbinas vierten a red es cuando circula la corriente cruzada diferencial. El modelo equivalente de corriente cruzada diferencial es el mismo para n turbinas que para 2, de forma que lo único que cambia es la fuente de tensión que equivale al convertidor, así para cada pareja de convertidores se tiene un modelo diferente. En este trabajo, esto no supone un problema ya que el valor de dicha tensión no afecta a la estabilidad, ya que lo que se va a calcular son las funciones de transferencia del sistema.

El modelo monofásico equivalente, Figura 48, es aquel en el que se tiene el modelo de una de las turbinas pero la salida del transformador se conecta a tierra en lugar de a red:

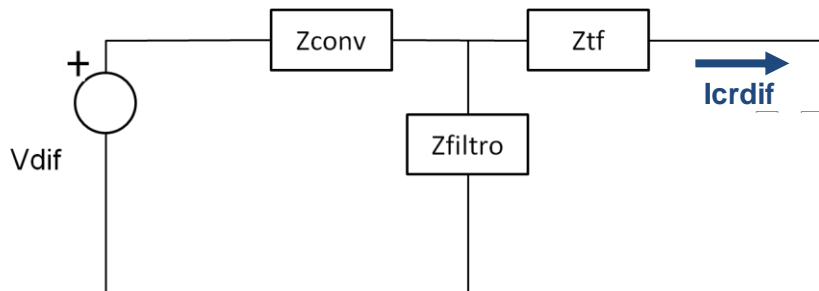


Figura 48. Modelo unifilar equivalente para la corriente cruzada diferencial

Todos los cálculos matemáticos realizados para obtener los anteriores modelos se observan en [JUA14].

5.2 CRITERIO DE ESTABILIDAD

En el caso del cálculo de parámetros para una sola turbina se ha decidido usar como criterio de elección aquel punto para el cual se cumplan los criterios de estabilidad y además, se tenga el mayor ancho de banda posible, porque se le ha dado prioridad a la velocidad del lazo de corriente. Por ello, en este caso de conexión de varias turbinas en paralelo, se mantendrá dicho criterio.

Se deberá observar, no sólo la estabilidad de los lazos ya explicados, sin considerar realimentación, sino que también se deberá comprobar que en el lazo cerrado el sistema no se vea afectado por la resonancia del filtro de red. Esta comprobación se realiza ya que al ir aumentando el número de turbinas, aumenta la impedancia de red y, con ello, la influencia de la resonancia del filtro de armónicos. De forma que en el momento en que la zona de alta frecuencia cruza al eje de ganancia unitaria, la corriente que pasa por el filtro de armónicos esta siendo amplificada y esto puede originar problemas, incluso hacer que el sistema llegue a la inestabilidad. Por lo que este aspecto también se debe vigilar.

Por eso, además de usar los criterios de frecuencia de corte, margen de fase y margen de ganancia del lazo abierto, se fijará también el criterio para el sistema en lazo cerrado, que consiste en que el margen de ganancia sea positivo y así no se produzca el cruce al eje de ganancia unitaria relacionado con la resonancia en lazo cerrado. En lugar de que dicho valore sea positivo se establecerá que el margen de ganancia sea mayor de 1 dB para dar mayor seguridad. Este criterio se aplicará únicamente en el lazo de interacción de una turbina con la red, ya que es el caso en el que la impedancia de red puede aumentar considerablemente.

En la Figura 49, se observa un ejemplo de un diagrama de Bode para el caso de conectar 18 turbinas en lazo cerrado:

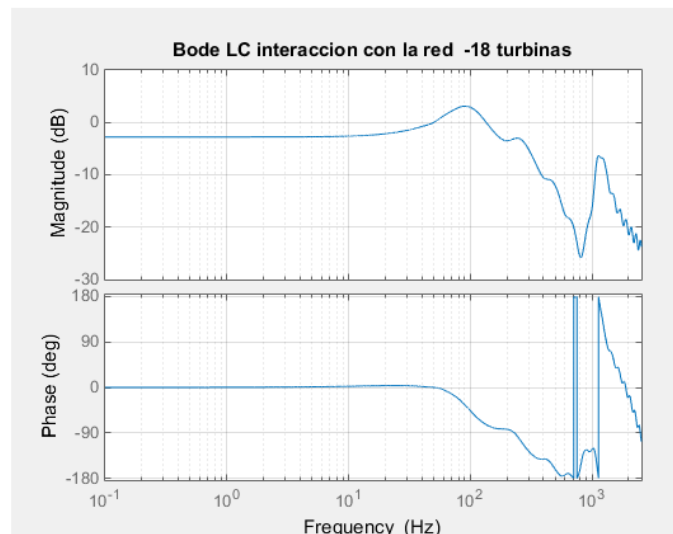


Figura 49. Diagrama de Bode en lazo cerrado del sistema con varias turbinas

Se observa como el efecto de la resonancia del filtro de red en lazo cerrado aumenta considerablemente y, por ello, es muy importante tenerlo en cuenta a la hora de estudiar la estabilidad.

5.3 OPCIONES DE CÁLCULO

Se distinguen tres formas posibles de cálculo al conectar varias turbinas, y en cada una de ellas se tendrán en cuenta las dos interacciones mencionadas anteriormente. En los tres casos se usa únicamente el sistema en el que se considera tanto la secuencia directa como la inversa.

A continuación, se distinguen las tres opciones de cálculo propuestas:

- Cálculo del número de turbinas para K_p y T_n obtenidas.
- Cálculo de K_p y T_n para conectar N turbinas.
- Cálculo del número máximo de turbinas a conectar.

En las tres situaciones se podrán visualizar los diagramas de bode, tanto en lazo abierto como cerrado, para los resultados obtenidos.

5.3.1 CÁLCULO DEL NÚMERO DE TURBINAS PARA K_p Y T_n OBTENIDAS

- **Interacción entre turbinas**

En primer lugar, se va a comprobar que el modelo equivalente a la interacción entre turbinas sea estable, ya que, en caso de que sea inestable no se calculará el número de turbinas a conectar, porque si este lazo es inestable el sistema será inestable para cualquier número de turbinas conectadas.

La interacción entre dos turbinas equivale a un modelo en el que el convertidor no se conecte a red. El modelo unifilar que se usa para calcular la función de transferencia se observa en la Figura 50:

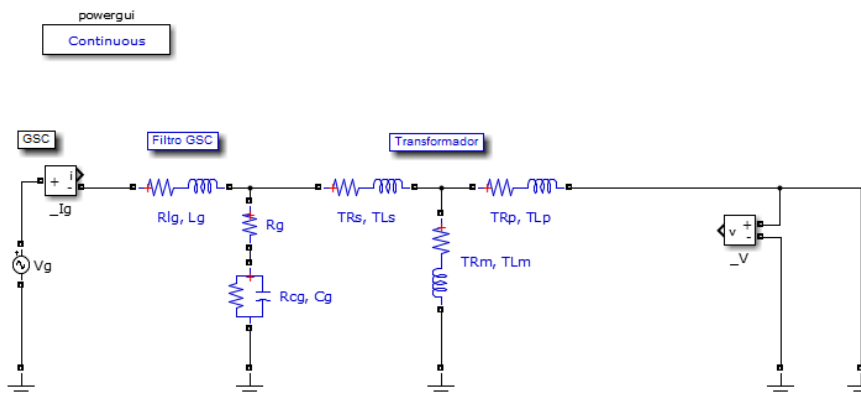


Figura 50. Modelo unifilar equivalente para la corriente cruzada diferencial (Simpower)

- **Interacción de una turbina con la red**

Para observar cómo se ve afectada la estabilidad al ir conectando turbinas a red se realiza un barrido para diferentes valores de la impedancia de red, de forma que la impedancia de red sea $n \cdot Z_{red}$, y se vaya variando n . El modelo unifilar a utilizar es el siguiente:

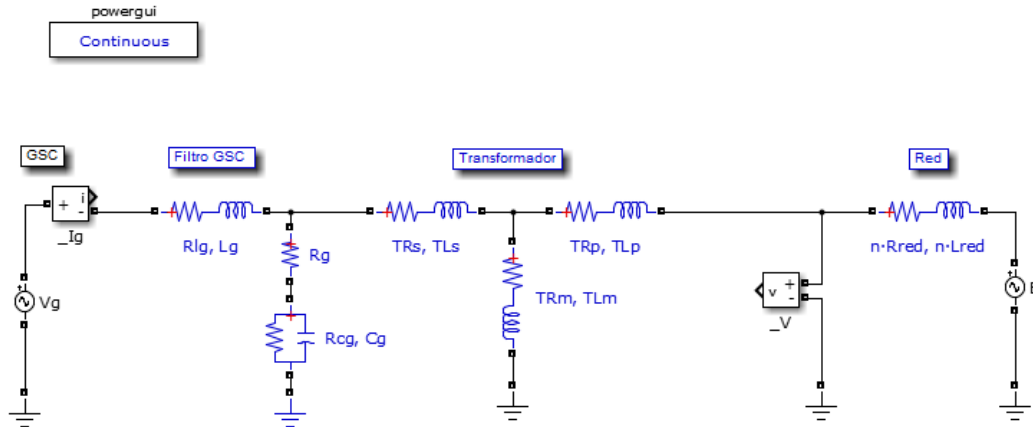


Figura 51. Modelo unifilar equivalente para la corriente normal (Simpower)

En función del criterio de estabilidad establecido se obtendrán unos valores u otros, siendo mayor el número de turbinas que se pueden conectar, cuanto menos estricto es el criterio usado.

Aunque es cierto, que al tener el criterio del lazo cerrado, llega un momento en el que, aunque se reduzca el valor de los límites de margen de fase y de ganancia del lazo abierto, el sistema no admite la conexión de un mayor número de turbinas.

En caso de que no haya una solución posible, el programa dará un aviso.

5.3.2 CÁLCULO DE KP Y TN PARA CONECTAR N TURBINAS

En este caso, se debe definir, en primer lugar, el criterio de estabilidad que se quiere utilizar junto con el número de turbinas que se quieren conectar, y la herramienta calculará, utilizando ese criterio, cuál es el valor de K_p y T_n , además de su ancho de banda.

Ahora, la estabilidad se mirará en el orden opuesto al apartado anterior. Primero, se calculan los valores de K_p y T_n atendiendo a la interacción de una turbina con la red y, posteriormente, se comprueba la estabilidad del modelo de interacción entre turbinas.

Una vez obtenidos los parámetros K_p y T_n óptimos se comprueba que el sistema, teniendo en cuenta la interacción entre turbinas, sea estable. Si para esos valores el sistema es inestable, se irá probando con las parejas de valores que cumplen los criterios de estabilidad, aunque no aporten el mayor ancho de banda posible, pudiendo así cambiar los valores óptimos finales de K_p y T_n .

Se ejecuta el programa de cálculo de los parámetros de una turbina, pero, en lugar de tener Z_{red} se tiene $n \cdot Z_{red}$, siendo n el número de turbinas que se quieren conectar.

Puede ocurrir que con los parámetros utilizados no se puedan conectar las turbinas deseadas, en ese caso, la herramienta dará un aviso, al igual que en el caso anterior.

En la Figura 52 se pueden observar los diagramas de Bode correspondientes a la conexión de 1, 20 y 40 turbinas para unos valores de K_p y T_n fijos. Se observa como la gráfica va desplazándose hacia arriba, en la parte de magnitud, teniendo más efecto la resonancia del filtro de red, conforme aumenta el número de turbinas, consiguiendo que el lazo finalmente se haga inestable:

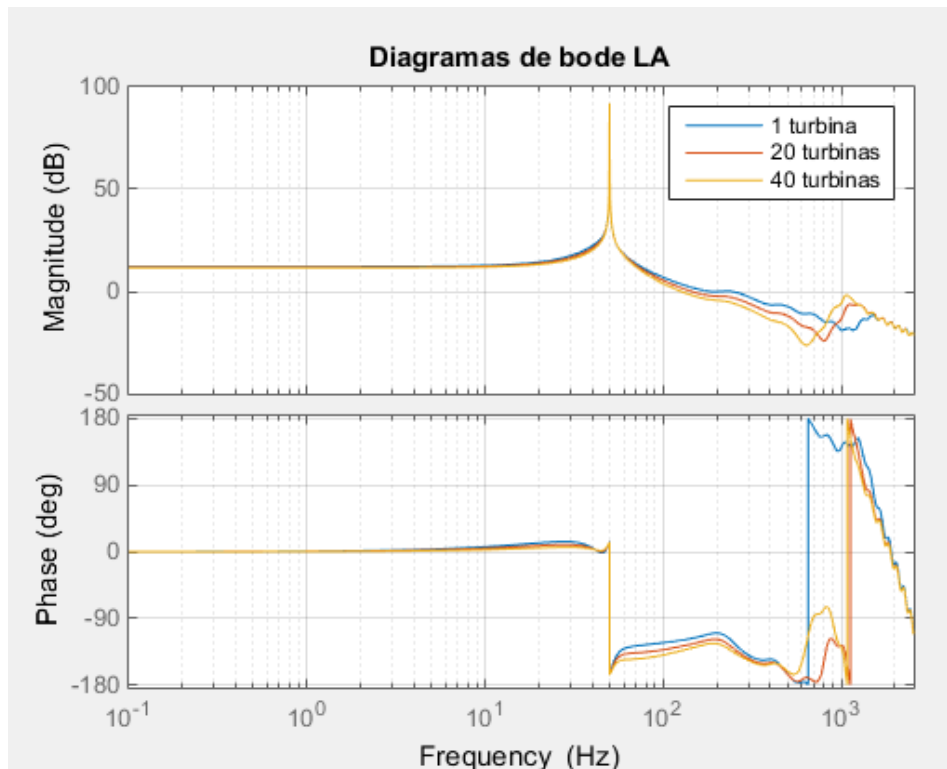


Figura 52. Diagrama de Bode obtenido al conectar 1, 20 y 40 turbinas

También se observa que la frecuencia de cruce a ganancia 0 dB va disminuyendo del mismo modo que disminuye el ancho de banda.

5.3.3 CÁLCULO DEL NÚMERO MÁXIMO DE TURBINAS A CONECTAR

En este caso se calcula el número máximo de turbinas a conectar para un criterio de estabilidad concreto.

El programa comienza con un número y en función de si el sistema es o no estable aumenta el número o disminuye.

Se comienza con 10 turbinas. Una vez fijado el número de turbinas y, por tanto, el de la impedancia de red, se intenta encontrar los valores de K_p y T_n que consigan que el sistema sea estable cumpliendo los criterios de estabilidad indicados, tanto los del lazo abierto como los del lazo cerrado.

En caso de que haya algún par de parámetros para los que se cumplan los criterios se repetirá el proceso con 20 turbinas, de forma que se aumentará el número de turbinas de 10 en 10 mientras el sistema siga siendo estable.

En caso de que no se cumpla algún criterio de estabilidad, se reducirá a la mitad el número de turbinas. Si para 10 sale inestable pasaría a ser 5, si para 20 es inestable, el número mínimo pasaría a ser 10 y, por tanto, el siguiente número a probar sería el 15...

En el momento en que ya se tiene un límite, es decir, un número mínimo para el cual se cumple la estabilidad, si para los números de turbinas que se van probando el sistema es inestable, se reduce a la mitad el número como ya se ha indicado, y, si es estable, se aumenta de uno en uno dicho número. De forma que, cuando el sistema detecte que para un número de turbinas el sistema tiene algún par de parámetros K_p y T_n para los cuales se cumplen los criterios de estabilidad, y para el siguiente número no haya ningún par que lo cumpla, entonces, detenga las iteraciones y asigne dicho número como el número máximo de turbinas a conectar.

Para entender dicho proceso de una forma más rápida y sencilla se muestra un pequeño diagrama de bloques en la Figura 53:

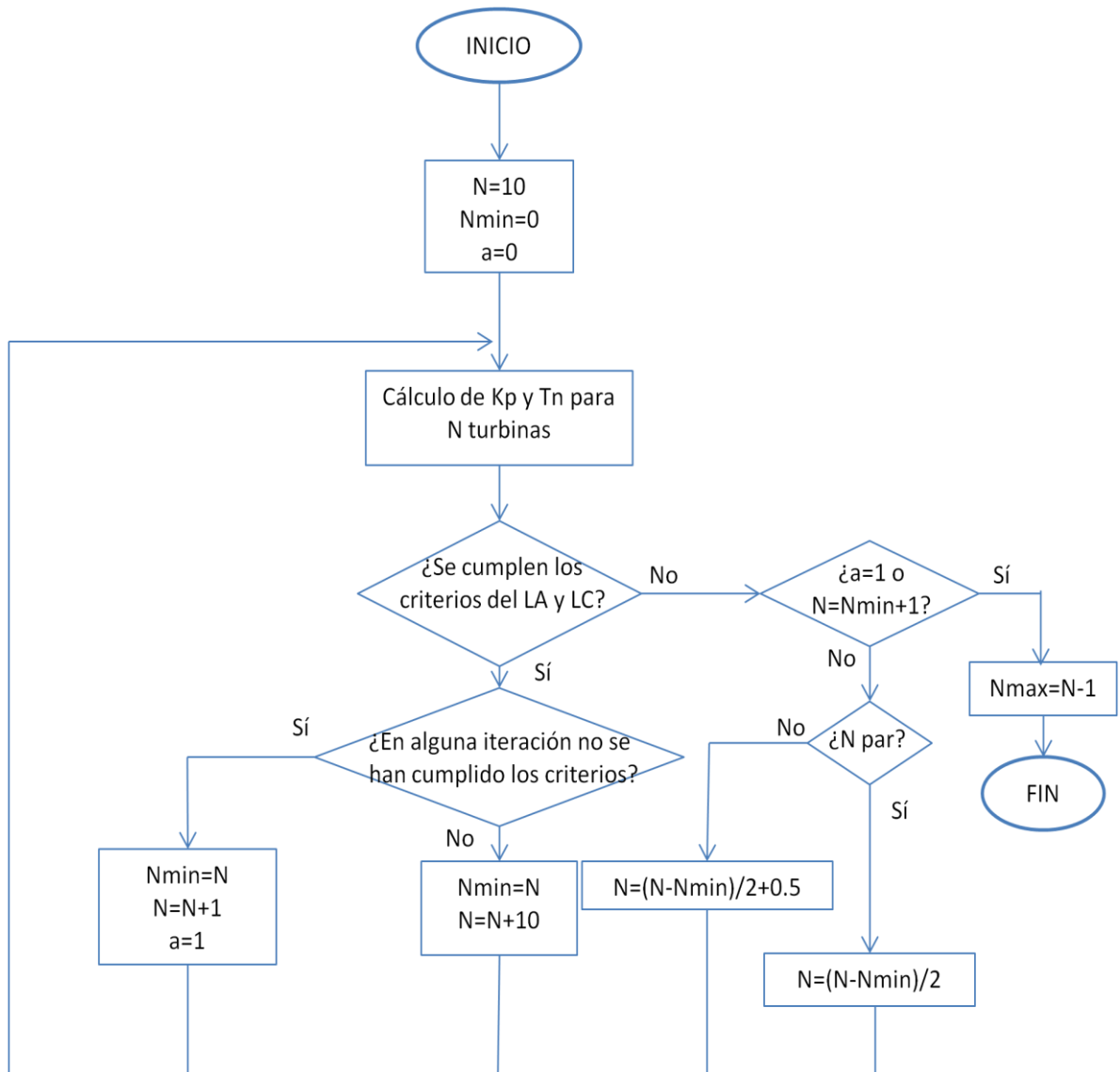


Figura 53. Diagrama de flujo del cálculo del número máximo de turbinas a conectar

6. INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica de usuario es una forma sencilla de comunicar al usuario con el sistema operativo de un ordenador. A través de dicha interfaz el usuario puede controlar de forma sencilla una aplicación de software, eliminando la necesidad de aprender un lenguaje o escribir comandos para poder ejecutar una aplicación o herramienta.

Todo lo explicado en los capítulos 4 y 5 se plasma en dicha interfaz, haciendo que la persona que vaya a utilizar la herramienta, lo pueda hacer de una forma cómoda y sencilla.

La interfaz consiste en una pantalla en la que se tienen diferentes elementos: botones, una lista de opciones, espacios para escribir o ventanas emergentes, por ejemplo.

En la Figura 54, se muestra el diagrama de flujo en el que se explican las opciones que se encuentran en la interfaz:

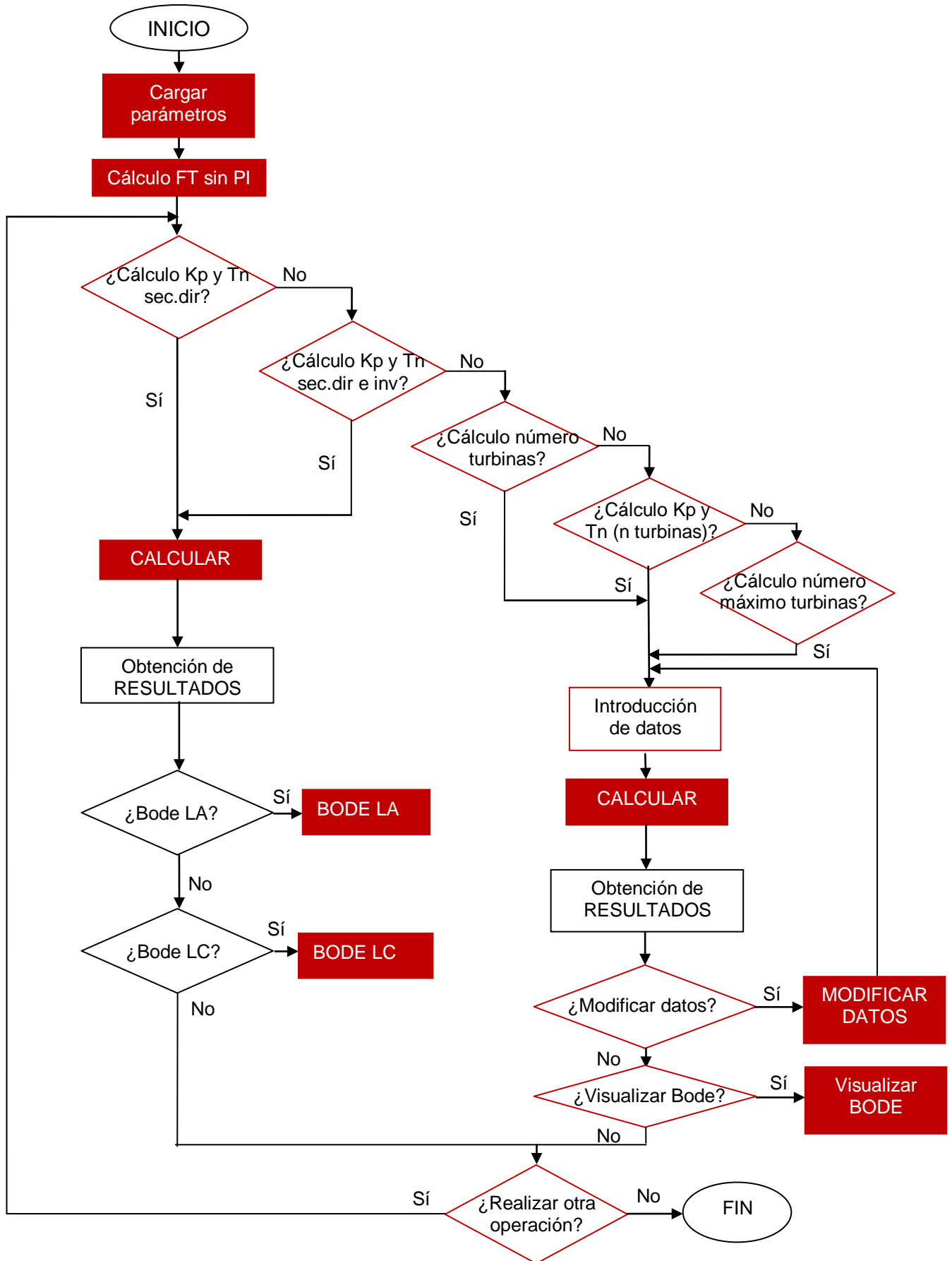


Figura 54. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz gráfica.

6.1 CARGA DE PARÁMETROS Y CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

En primer lugar se debe tener en un script los parámetros a usar en el programa, que en este caso serán los siguientes:

- Parámetros del sistema físico:
 - R_{conv} : Resistencia a la salida del convertidor
 - L_{conv} : Inductancia a la salida del convertidor
 - R_f : Resistencia del filtro de red
 - R_{cf} : Resistencia para modelar las fugas del condensador
 - C_f : Condensador del filtro de red
 - $TLpri$: Inductancia del primario del transformador
 - $TRpri$: Resistencia del primario del transformador
 - $TLsec$: Inductancia del secundario del transformador
 - $TRsec$: Resistencia del secundario del transformador
 - $TLmag$: Inductancia de magnetización del transformador
 - $TRmag$: Resistencia de magnetización del transformador
 - L_{red} : Inductancia de red
 - R_{red} : Resistencia de red
- Parámetros del control del lazo de corriente:
 - f_0 : Frecuencia fundamental 50 Hz
 - ω_0 : Pulsación a la frecuencia fundamental
 - T_{mg} : Periodo de control
 - Td_{Ig} : Tiempo de retraso de adquisición de la corriente
 - Td_{Vg} : Tiempo de retraso de adquisición de la tensión
 - Th_{Ig} : Constante de tiempo del filtro pasabajo de corriente (hardware)
 - Th_{Vg} : Constante de tiempo del filtro pasabajo de tensión (hardware)
 - Tf_{Ig} : Constante de tiempo del filtro pasabajo de corriente (software)
 - Tf_{Vg} : Constante de tiempo del filtro pasabajo de tensión (software)

En caso de que se modifique alguna variable o se añada alguna nueva se deberá modificar el script y el código de la interfaz, añadiendo dicha variable donde corresponda.

Una vez preparados los datos se puede comenzar a usar la herramienta.

Primero se debe ejecutar en Matlab el script con todos los parámetros anteriores. A continuación, se abre la pantalla, Figura 55.

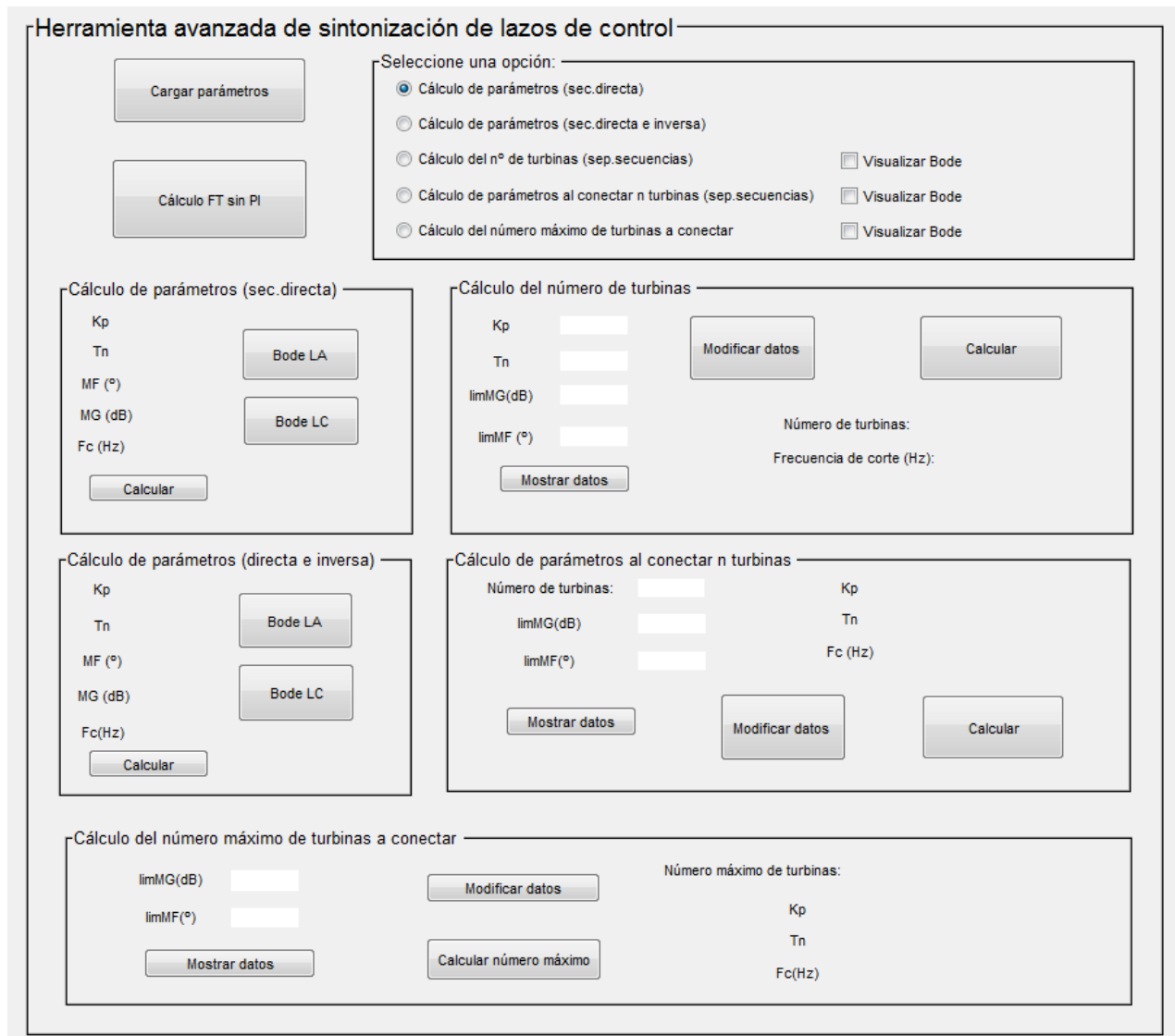
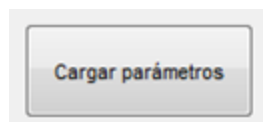


Figura 55. Interfaz gráfica de la herramienta de sintonización de lazos de control.

Para comenzar se debe pulsar el botón “Cargar parámetros” y el programa se encarga de pasar los parámetros, ya comentados, de un workspace a otro, para poder usarlos continuamente.



El código consiste básicamente en declarar las variables y moverlas de un directorio a otro usando el comando *evalin*.

Después se debe pulsar el botón “Cálculo FT sin PI” y esperar unos segundos mientras se ejecuta, ya que este proceso no es tan rápido como el anterior.



Cuando se pulsa lo que hace el programa es llamar a la función que se encarga de aportar la función de transferencia. Cada vez que se llame a una función se le debe pasar los parámetros que necesite para ejecutarse y guardarse los resultados que sean requeridos, en este caso, la función de transferencia sin tener en cuenta el controlador.

En esta parte se obtienen las funciones de transferencia a utilizar a lo largo del programa:

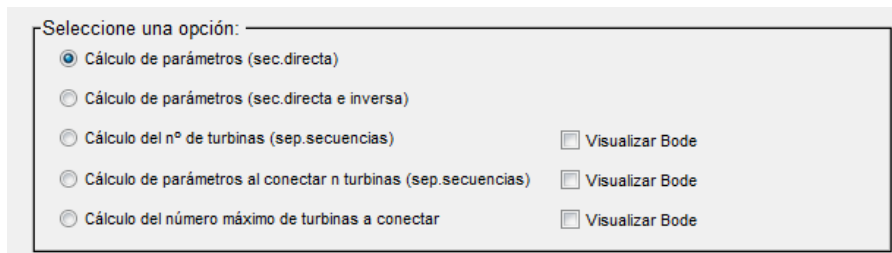
-*Calculo_FT*: Función resultante al considerar la impedancia de red introducida en el script de los parámetros.

-*CalculoFT_sinZred*: Función obtenida al considerar que no hay impedancia de red, para el caso de la conexión de varias turbinas en paralelo.

-*Calculo_FTsinfiltro*: Función obtenida al eliminar el filtro de red, que será la que se use como punto de partida en todos los casos.

6.2 ELECCIÓN DE UNA DE LAS OPCIONES

Una vez que se tienen tanto los parámetros como la función de transferencia se procede a elegir el método a llevar a cabo. Se debe elegir una de las siguientes opciones:



Seleccione una opción: _____

- Cálculo de parámetros (sec.directa)
- Cálculo de parámetros (sec.directa e inversa)
- Cálculo del nº de turbinas (sep.secuencias) Visualizar Bode
- Cálculo de parámetros al conectar n turbinas (sep.secuencias) Visualizar Bode
- Cálculo del número máximo de turbinas a conectar Visualizar Bode

Figura 56. Cuadro de la interfaz con las diferentes opciones posibles.

Aparece marcada, por defecto, la primera de las opciones, pero en caso de querer ejecutar esa opción se debe volver a pulsar sobre ella para que el programa la reconozca.

Cada opción va asociada a una de las 5 zonas de la pantalla, de forma que al seleccionar una de ellas los botones relacionados con el resto de opciones quedan deshabilitados tal y como se observa en este caso, al elegir la tercera opción:

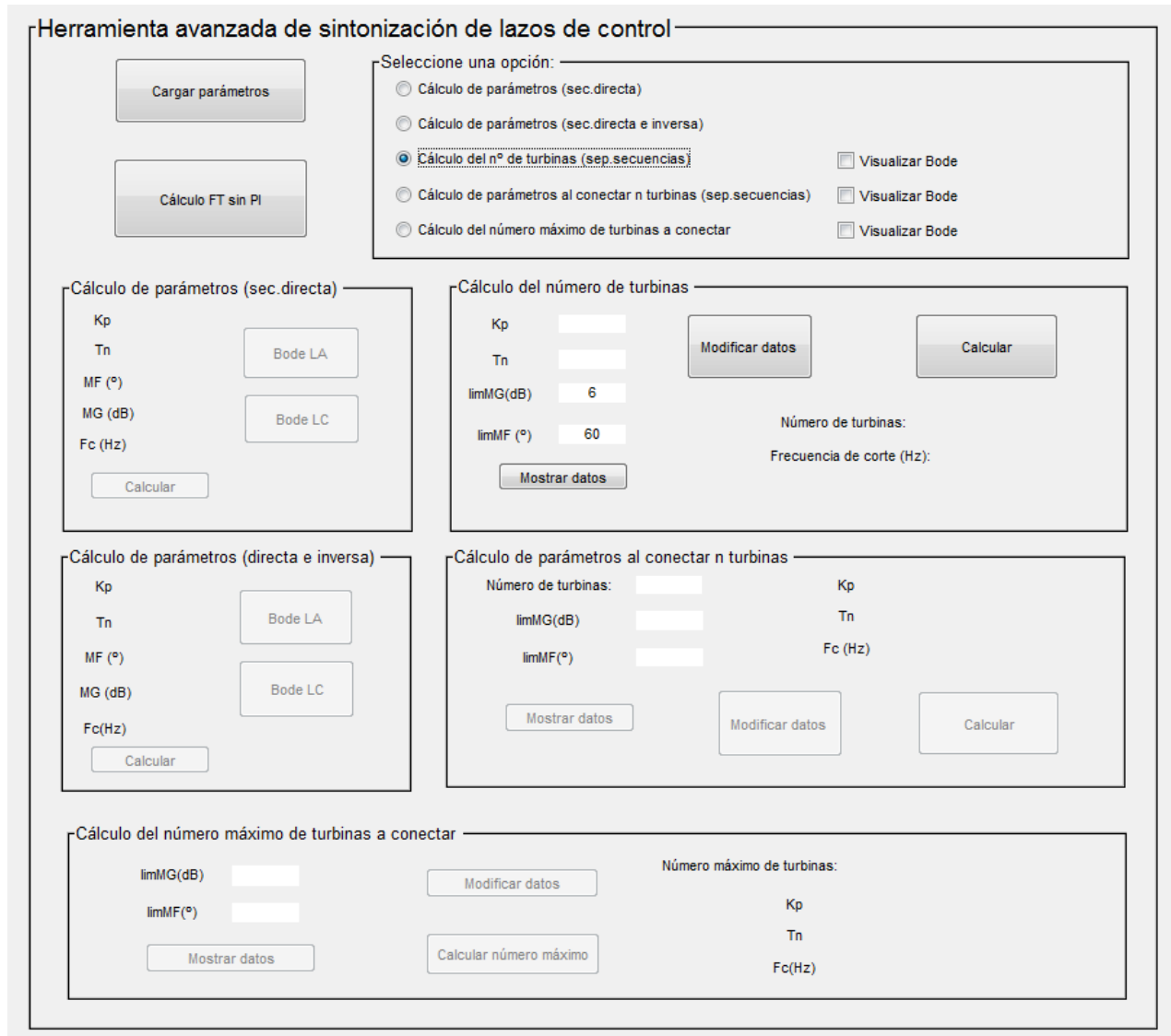
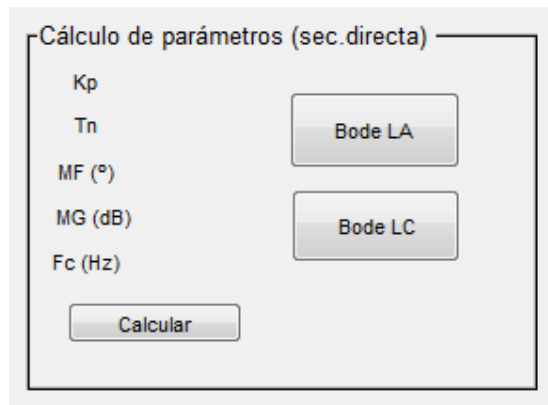


Figura 57. Interfaz gráfica visualizada al elegir la tercera opción.

Para cada una de las opciones se realiza un proceso diferente:

6.2.1 OPCIÓN 1: CÁLCULO DE PARÁMETROS (SECUENCIA DIRECTA)

Al elegir esta opción la zona a la que se debe atender de la interfaz es la que se observa en la Figura 58:



Cálculo de parámetros (sec.directa)

Kp

Tn

MF (°)

MG (dB)

Fc (Hz)

Bode LA

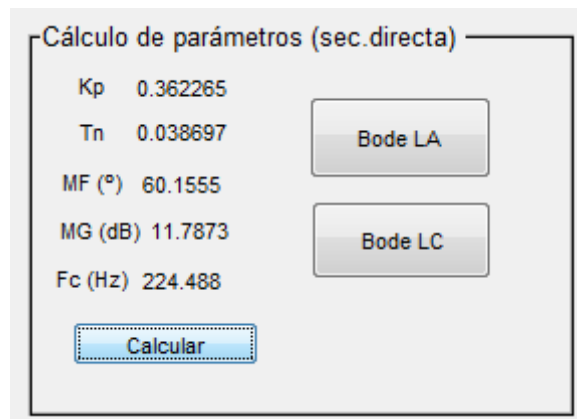
Bode LC

Calcular

Figura 58. Cuadro correspondiente al cálculo de parámetros con secuencia directa.

En esta opción no se debe introducir ningún parámetro. Al pulsar sobre ella se observa como solamente está habilitado uno de los cuadros de la pantalla, y se debe pulsar el botón "Calcular". Al pulsar este botón se llama a la función *secuencia_directa* que calcula los parámetros de K_p y T_n para los que el sistema cumpla los criterios de estabilidad y la velocidad del lazo sea la mayor posible.

Cuando finaliza se muestran los resultados obtenidos, tal y como se observa en la Figura 59:



Cálculo de parámetros (sec.directa)

Kp 0.362265

Tn 0.038697

MF (°) 60.1555

MG (dB) 11.7873

Fc (Hz) 224.488

Bode LA

Bode LC

Calcular

Figura 59. Solución obtenida en la primera opción posible.

Además de los resultados numéricos se pueden visualizar el diagrama de Bode tanto del lazo abierto como del lazo cerrado. Haciendo click en cualquiera de las opciones aparece una nueva figura con el diagrama correspondiente:

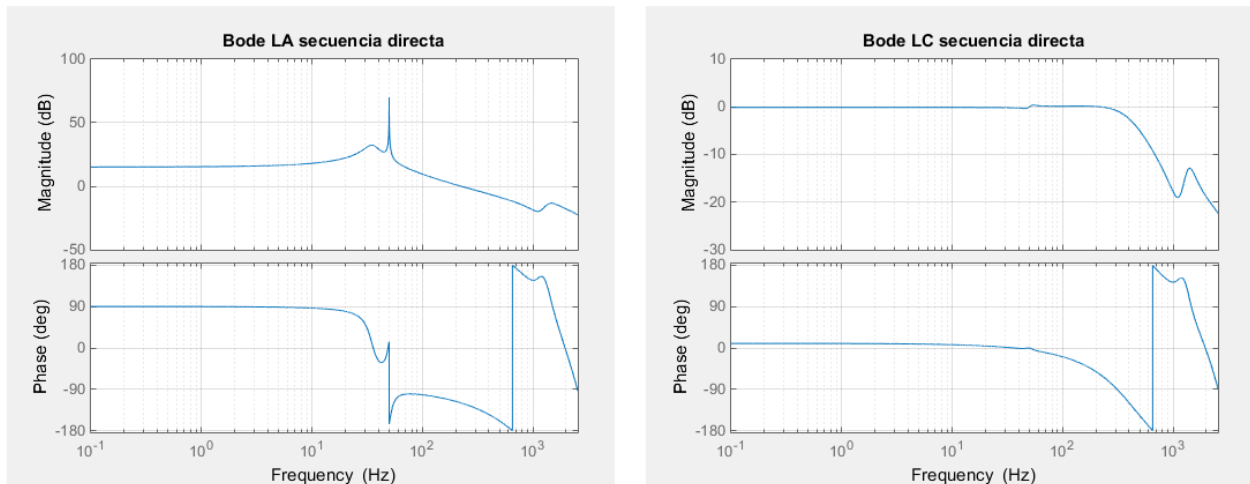


Figura 60. Diagramas de Bode en LA (izquierda) y LC (derecha) para la secuencia directa de una sola turbina.

6.2.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS (SECUENCIA DIRECTA E INVERSA)

La segunda opción, en cuanto a funcionamiento, es similar a la primera. En este caso, se calculan los valores de K_p y T_n considerando que existe tanto secuencia directa como inversa:

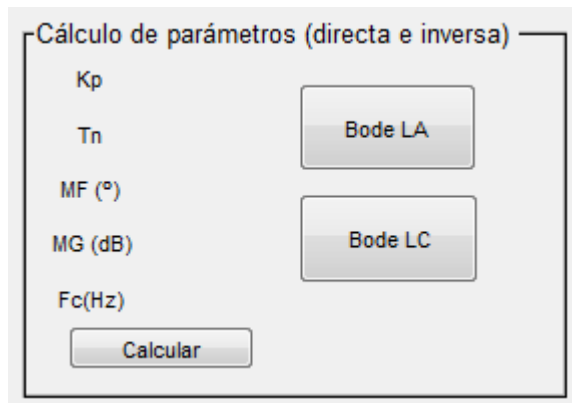


Figura 61. Cuadro correspondiente al cálculo de parámetros con secuencia directa e inversa.

Ahora, al pulsar la opción “Calcular” se llama a la función *sep_secuencias* que calcula los parámetros K_p y T_n óptimos.

Los resultados se muestran de la siguiente forma:



Figura 62. Solución obtenida en la segunda opción posible

Al igual que en el caso anterior se pueden pulsar los botones *Bode LA* y *Bode LC* y se obtienen ambos diagramas:

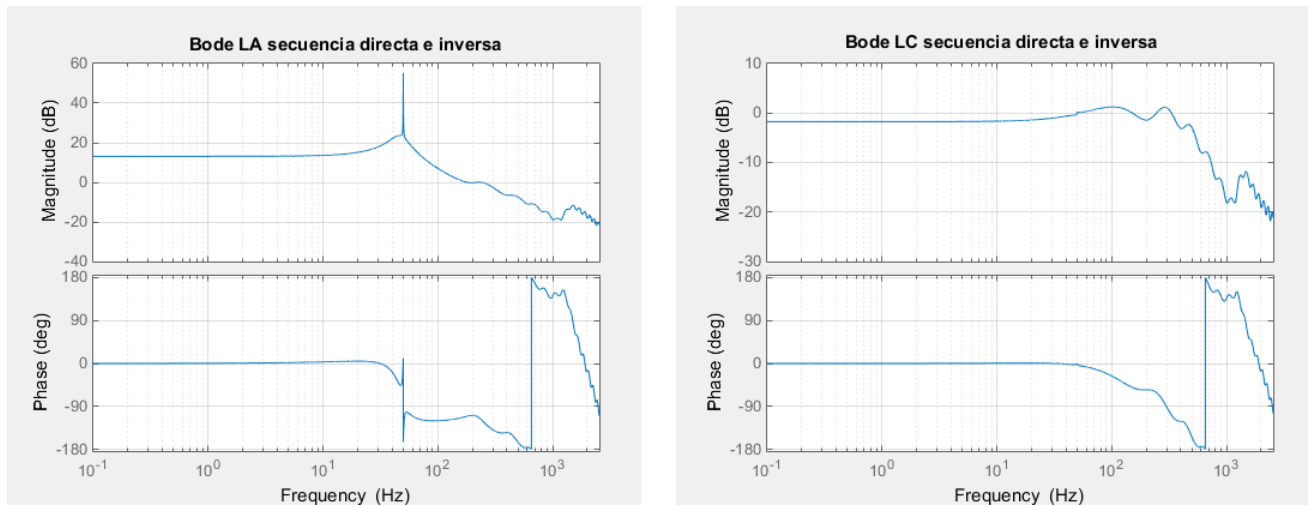


Figura 63. Diagrama de Bode obtenido en la 2ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)

6.2.3 CÁLCULO DEL NÚMERO DE TURBINAS (SEPARACIÓN DE SECUENCIAS)

En este caso, al elegir la opción deseada aparece una ventana que indica que se deben introducir los valores de K_p , T_n y, además, se pueden modificar los valores del límite de margen de fase y de margen de ganancia al pulsar “Cambiar límites de MG y MF”:



Figura 64. Ventana de introducción de datos que aparece al elegir la tercera opción.



Figura 65. Ventana que aparece para cambiar los límites del margen de fase y de ganancia.

Una vez introducidos se pulsa la tecla de “Continuar” y se cierran ambas ventanas. A continuación, se debe pulsar la tecla de “Calcular” y es entonces cuando se ejecuta el programa.

El código consiste en llamar, primero, a la función *Estab_entturb* que comprueba la estabilidad del lazo de interacción entre turbinas, y, posteriormente, a la función *sep_secuencias*, que

calcula el número de turbinas que se pueden conectar según esos criterios de estabilidad y para esos valores de K_p y T_n . Una vez que finalice la función, se mostrará en la pantalla tanto el número de turbinas a conectar como el valor del ancho de banda para esos valores de K_p y T_n .

En caso de querer modificar cualquiera de los datos que se introducen, se debe pulsar la tecla “Modificar datos” y vuelve a aparecer la ventana de introducción de datos. A continuación, se pulsa de nuevo la tecla “Calcular” y se ejecuta de nuevo el código. Para mostrar los datos introducidos en la pantalla principal se debe pulsar la tecla “Mostrar datos”.

Tanto en esta opción, como en las dos siguientes, que se deben introducir los límites de margen de fase y de ganancia, se tienen como valores por defecto 6 dB y 60°.

Si se da el caso en el que para esos valores introducidos no se pueden conectar en paralelo ninguna turbina, el programa saca por pantalla un error, que se observa en la Figura 66:

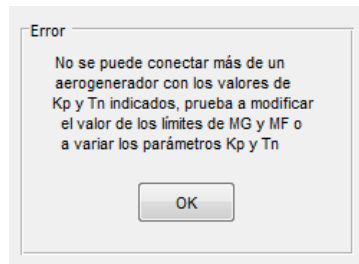


Figura 66. Cuadro de error que aparece si no se pueden conectar turbinas en paralelo.

Otro ejemplo para el cual sí se obtiene un resultado de un número de turbinas mayor se observa en la Figura 67:

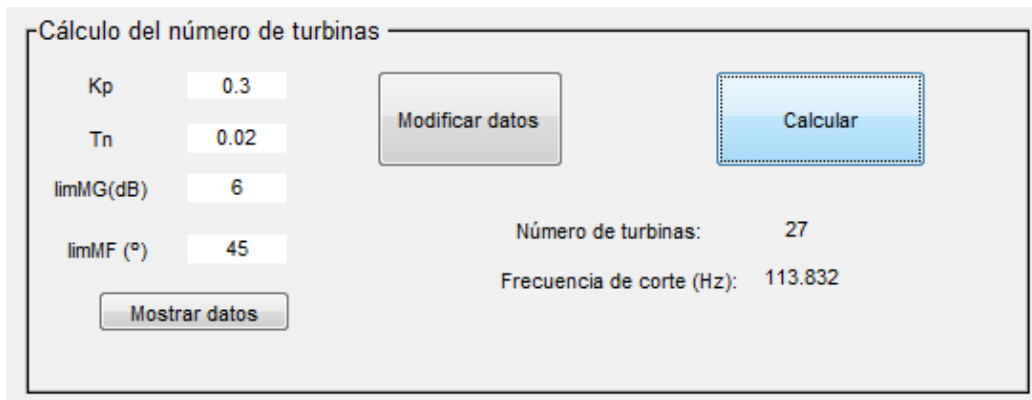


Figura 67. Solución obtenida en la tercera opción posible.

Se observa como para los valores de $K_p=0.3$ y $T_n=0.02$, con unos límites de margen de ganancia y de fase de 6 dB y 45 °, respectivamente, el número de turbinas a conectar es de 18. El ancho de banda de 120 Hz es el menor de los valores que se obtienen en los dos lazos de interacción con la red y entre turbinas.

En caso de pulsar la opción de *Visualizar bode* aparecen los diagramas de Bode del lazo abierto y cerrado, tanto del lazo de interacción entre turbinas como del lazo de interacción con la red. Todos ellos se observan en las Figuras 68 y 69:

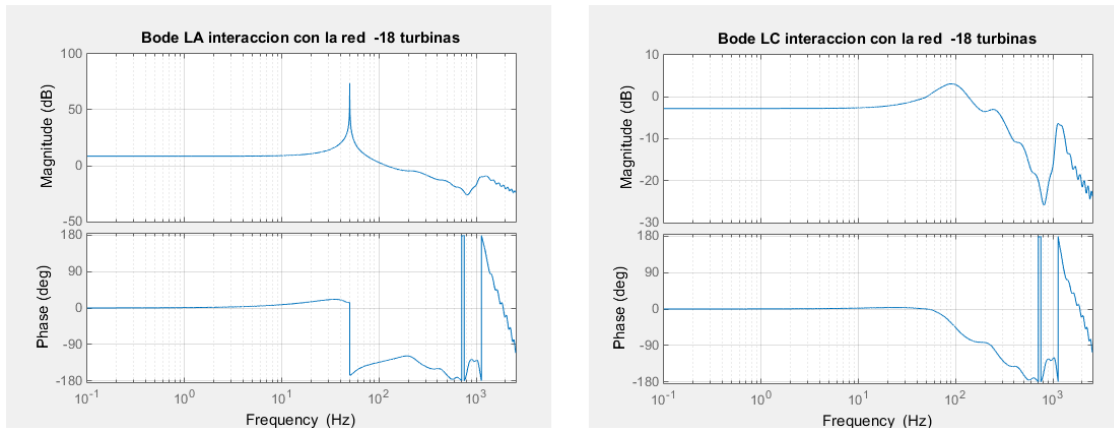


Figura 68. Diagrama de Bode de interacción de una turbina con la red, obtenido en la 3ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)

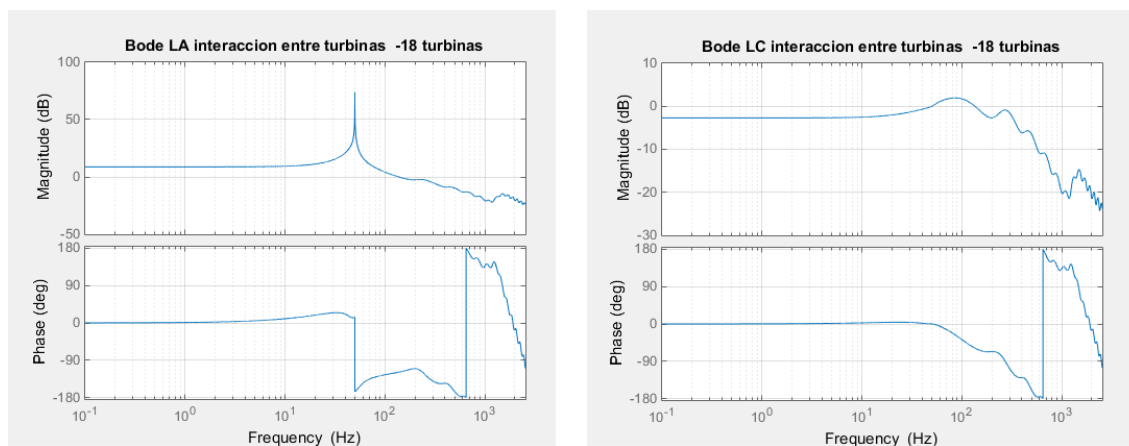


Figura 69. Diagrama de Bode de interacción entre turbinas, obtenido en la 3ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)

Se observa, tal y como ya se ha comentado antes, que la resonancia del filtro de red tiene un mayor efecto al aumentar el valor de la impedancia de red. Sin embargo, en el lazo de interacción entre turbinas, su efecto no supone un peligro para la estabilidad, tal y como se esperaba.

6.2.4 CÁLCULO DE PARÁMETROS AL CONECTAR N TURBINAS (SEPARACIÓN DE SECUENCIAS)

En esta opción también se deben introducir algunos datos para poder empezar la simulación. En este caso son el límite del margen de fase y del margen de ganancia y el número de turbinas que se quieren conectar. La ventana que aparece se muestra en la Figura 70:

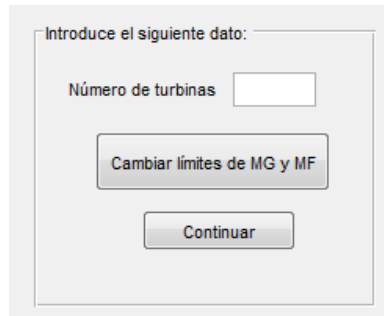


Figura 70. Ventana de introducción de datos que aparece al elegir la cuarta opción

Al pulsar la opción de “Cambiar límites de MG y MF” se abre de nuevo la ventana de la Figura 65.

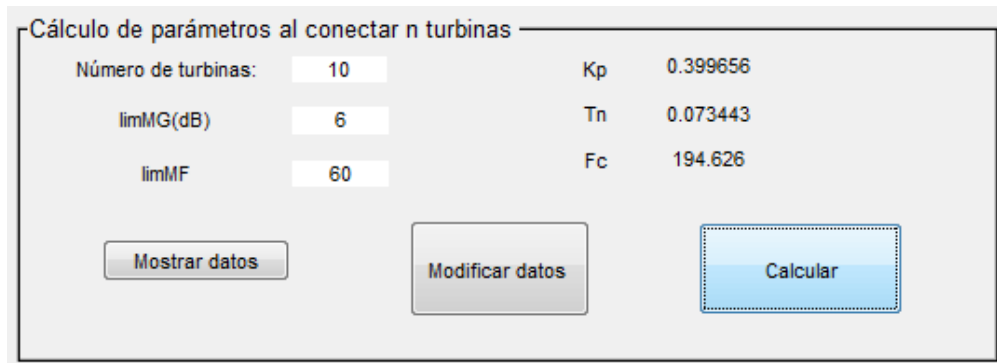
Al igual que antes se pulsa la tecla de “Continuar” y, a continuación, la tecla “Calcular” y comienza a ejecutarse el código. En este caso el proceso es el contrario:

-Primero, gracias a las funciones *Calculo_FT* y *Calculo_FTsinfiltro* se calculan las funciones de transferencia a utilizar para el número de turbinas indicado.

-Después, se llama a la función *sep_secuencias* que calcula los valores de K_p y T_n para los que el lazo de interacción con la red cumple los criterios de estabilidad tanto del lazo abierto como del lazo cerrado.

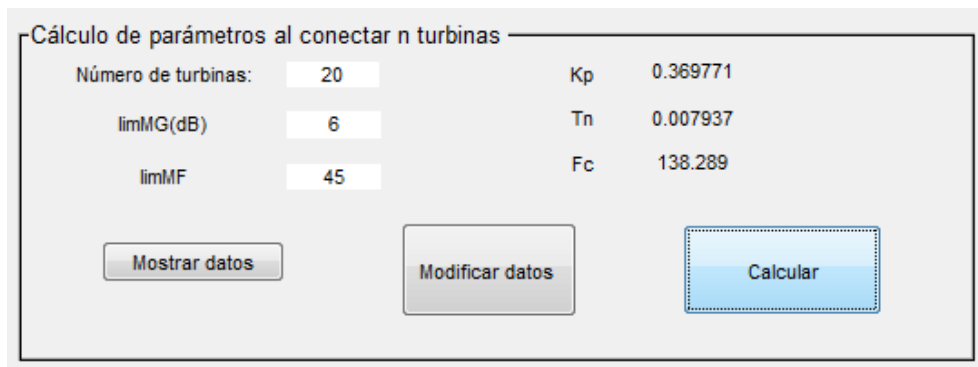
-Por último, se comprueba que dichos valores sean válidos al llamar a la función *est_turb_kpfn* que comprueba la estabilidad del otro lazo.

Si existe un resultado posible se muestran los resultados por pantalla. En las Figuras 71 y 72 se muestran dos ejemplos para diferentes límites y diferente número de turbinas:



Cálculo de parámetros al conectar n turbinas			
Número de turbinas:	10	K_p	0.399656
limMG(dB)	6	T_n	0.073443
limMF	60	F_c	194.626

Figura 71. Solución obtenida para conectar 12 turbinas, en la cuarta opción posible.



Cálculo de parámetros al conectar n turbinas			
Número de turbinas:	20	K_p	0.369771
limMG(dB)	6	T_n	0.007937
limMF	45	F_c	138.289

Figura 72. Solución obtenida para conectar 20 turbinas, en la cuarta opción posible.

De nuevo aparecen, en caso de pulsar la opción de *Visualizar bodes*, los diagramas correspondientes tanto del lazo de interacción con la red como del lazo de interacción entre turbinas.

En caso de que no se puedan conectar ese número de turbinas aparece una nueva ventana con un mensaje, en el que se indica que esa conexión no es posible, tal y como se ve en la Figura 73:



Figura 73. Cuadro de error que aparece si no se pueden conectar ese número de turbinas en paralelo.

6.2.5 CÁLCULO DEL NÚMERO MÁXIMO DE TURBINAS A CONECTAR

En cuanto al funcionamiento, esta opción es similar a las anteriores. Primero, se deben introducir los valores límites del margen de fase y de ganancia, y, a continuación, pulsar la tecla de "calcular".

Para ello se debe pulsar la opción "Modificar datos" y aparece el cuadro que se observa en la Figura 65.

Este es el proceso que más tiempo consume de las diferentes opciones presentadas. El proceso que se lleva a cabo ya se ha explicado en el apartado anterior, se irá iterando con el número de turbinas a conectar, de forma que para cada nuevo valor se llame a las funciones *sep_secuencias* y *est_turb_kptn*. El resultado obtenido para 60° de margen de fase y 6 dB ganancia indicados es de 12 turbinas se presenta en la Figura 74:

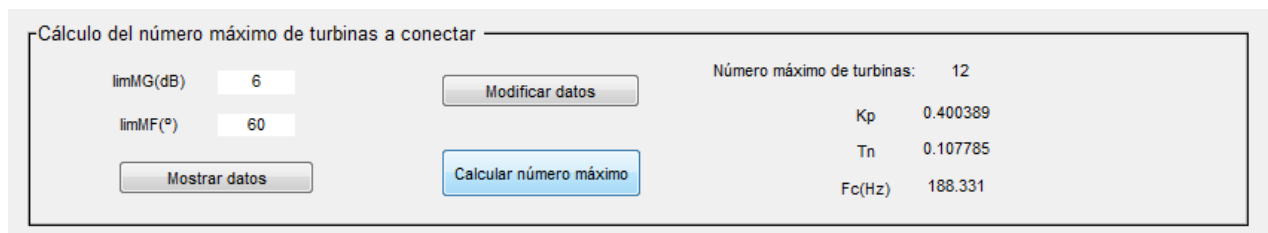

 A screenshot of a software interface titled "Cálculo del número máximo de turbinas a conectar". On the left, there are two input fields: "limMG(dB)" with the value "6" and "limMF(°)" with the value "60". Below these are two buttons: "Mostrar datos" and "Calcular número máximo". In the center, there is a button labeled "Modificar datos". On the right side, the results are displayed: "Número máximo de turbinas: 12", "Kp 0.400389", "Tn 0.107785", and "Fc(Hz) 188.331".

Figura 74. Solución obtenida teniendo como límites 60° y 6 dB, en la quinta opción posible.

Otro resultado obtenido al modificar los criterios de estabilidad se observa en la Figura 75:

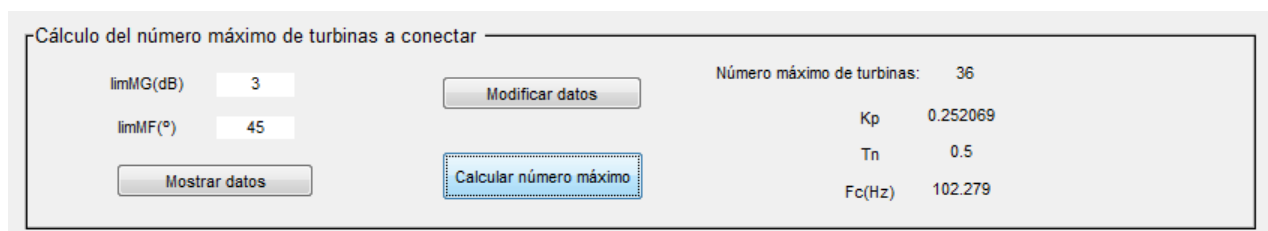

 A screenshot of the same software interface as in Figure 74, but with different input values. "limMG(dB)" is now "3" and "limMF(°)" is "45". The "Calcular número máximo" button is highlighted with a dashed blue border. The results on the right are: "Número máximo de turbinas: 36", "Kp 0.252069", "Tn 0.5", and "Fc(Hz) 102.279".

Figura 75. Solución obtenida teniendo como límites 45° y 3 dB, en la quinta opción posible.

Se observa de nuevo cómo, al disminuir los límites de estabilidad, se consiguen un mayor número de turbinas a conectar. También se observa cómo el valor de K_p no varía mucho pero si lo hace el valor de T_n . Al igual que en los dos casos anteriores, los diagramas de Bode correspondientes a los resultados obtenidos se pueden visualizar.

7. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES

El estudio de la estabilidad en la inyección de corriente a red en los sistemas eólicos de gran potencia se ha convertido en un tema de crucial importancia. Uno de los aspectos críticos para garantizar la estabilidad es la impedancia en el punto de conexión a red. La inductancia ofrecida por la red forma parte del filtro de red de la etapa de conversión de potencia. A diferencia de los componentes de filtrado propios de la etapa de potencia, la inductancia de red presenta una gran variación de unos puntos de conexión a otros. En particular, dicha inductancia gana protagonismo en el caso de la conexión de múltiples generadores a un mismo punto de red, que es la situación general ya que las grandes turbinas se integran como parte de un parque eólico. El problema de diseño se complica cuando se considera que la turbina eólica podrá formar parte de un parque eólico en cualquier país del mundo, ya que la dispersión en los parámetros de la impedancia de red es muy elevada.

Por ello, es necesario disponer de herramientas que faciliten el estudio de la estabilidad del conjunto formado por la impedancia de red y el convertidor de potencia, incluyendo en éste último el lazo de control de corriente y la propia etapa del filtro de potencia. Precisamente este es el contexto en el que se enmarca la herramienta diseñada en este trabajo. Su propósito es facilitar la sintonización de los controladores utilizados para regular la corriente, en definitiva, la potencia, inyectada a la red, atendiendo a criterios de estabilidad global y de velocidad de respuesta. Debido a que el filtro de red presenta varias frecuencias de resonancia y al elevado rango de variabilidad de la impedancia de red, la sintonización de los controladores es una tarea compleja que precisa manejar varias variables simultáneamente y validar la solución concreta bajo un criterio de estabilidad adecuado, lo que resulta costoso con las actuales herramientas de análisis. Para afrontar estos retos, en este trabajo se ha realizado una identificación previa de las limitaciones presentes en la herramienta previamente utilizada en Ingeteam Power Technology para calcular los parámetros del controlador. Como consecuencia se ha desarrollado una nueva herramienta en la que se introducen varias modificaciones importantes que hacen que los resultados del análisis de estabilidad respondan más fielmente a la realidad de un parque eólico. Dicho análisis se ha automatizado y proporciona los resultados en un tiempo de cómputo razonable.

Como ya se ha indicado, el primer tema abordado en este trabajo ha sido la identificación de las limitaciones significativas de la herramienta previa utilizada para sintonizar el controlador, tipo PI, utilizado en los generadores de conexión a red de las turbinas eólicas. En este sentido cabe destacar los siguientes aspectos:

- En la herramienta previa se realizaba el estudio del sistema en dq utilizando un modelo en el que se despreciaban, debido a la complejidad que supone incluirlos, los términos cruzados de las corrientes y tensiones en d y q presentes al modelar los componentes pasivos de la etapa de filtrado. Por lo tanto, ese modelo introducía una incertidumbre adicional sobre la dinámica real que se obtendrá en el sistema. Para realizarlo de la forma más correcta posible se deberían tener en cuenta las fuentes de corriente y de tensión obtenidas al realizar la transformación a dq lo que matemáticamente, incluso recurriendo a una herramienta de cálculo tan potente como Matlab, es un proceso de gran dificultad.
- El estudio de estabilidad únicamente consideraba la secuencia directa, sin tener en cuenta que pudiese haber desequilibrios en la red. Por ello, no se detectaban los posibles problemas que pueden surgir como consecuencia de una componente significativa de secuencia inversa en la tensión de red.

- El método de cálculo basado en la resolución matemática mediante las fórmulas del margen de fase y de ganancia unitaria se limitaba a obtener los valores de los parámetros atendiendo al rango bajo de frecuencia, identificando como punto crítico la frecuencia de corte del lazo de corriente y sin tener en cuenta lo que ocurre a otras frecuencias. Sin embargo, es precisamente a altas frecuencias donde el comportamiento resonante del filtro de red puede llevar al sistema a la inestabilidad, siendo así no válidos los resultados que se obtengan bajo el criterio de evaluación de la estabilidad analizando la respuesta del sistema únicamente a la frecuencia de corte.
- No se había abordado el problema que puede originar el conectar varias turbinas a la misma red. Tal y como se ha visto, tanto en estudios teóricos como experimentalmente en diferentes parques eólicos, la conexión de múltiples turbinas modifica la influencia de la inductancia de red en la frecuencia de resonancia del filtro y con ello en la estabilidad del sistema.

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta de análisis que permite superar cada una de dichas carencias. En concreto, la solución aportada se ha centrado en afrontar las tres primeras limitaciones de la herramienta previa y, en lo referente a la última de ellas, se ha dado un primer paso que permite incorporar un primer estudio sobre la integración de múltiples turbinas en un parque eólico. Las conclusiones y aspectos más destacables sobre la herramienta desarrollada se resumen de la siguiente forma:

- El sistema no se modela en ejes dq, sino en alpha-beta. De esta forma se trabaja sobre un modelo que representa de forma más precisa la realidad, ya que no es necesario prescindir de los términos acoplados puesto que no forman parte del modelo en este marco de referencia. Como consecuencia también se han transformado los elementos del lazo de control de dq a alpha beta con un sencillo cambio de sistema de referencia. Al hacer este cambio, los controladores PI implementados en ejes dq en la tarjeta de control del convertidor de potencia, se reflejan como controladores PI resonantes alpha-beta. Dicha transformación resulta fácilmente identificable en los diagramas de Bode ya que originan un pico de gran ganancia a 50 Hz.
- Esta herramienta no se limita a analizar sistemas equilibrados, sino que incorpora una identificación de las secuencias directa e inversa y con ello permite estudiar la estabilidad de los lazos de control, con PI independientes, de ambas secuencias.
- Se ha desarrollado un método iterativo para identificar el grado de estabilidad del sistema, es decir, la etapa de potencia y su control, que estudia la estabilidad mediante el cómputo de los valores de margen de fase y de ganancia aportados por los diagramas de Bode en todo el margen de frecuencias hasta la mitad de la frecuencia de conmutación.
- Además de obtener los parámetros del controlador para una turbina, también se introduce un sencillo estudio de la estabilidad cuando se conectan varias turbinas en paralelo a la red. Se aportan tres métodos diferentes de cálculo de parámetros:
 - El primero se basa en el cálculo del número de turbinas a conectar para unos parámetros de los controladores concretos.
 - El segundo calcula los parámetros de los controladores para un número concreto de turbinas a conectar.
 - El tercero calcula el número máximo de turbinas a conectar en función de los límites de margen de fase y de ganancia que se fijen.

Aunque el trabajo ha tenido por objeto el desarrollo de la herramienta de cálculo y no el análisis práctico propiamente dicho de los resultados obtenidos, se puede concluir que conforme aumenta el número de turbinas que se quieren conectar a la misma red, el sistema va reduciendo su margen de fase, su margen de ganancia y su ancho de banda. Resultados plenamente concordantes con la experiencia de la empresa en diferentes parques eólicos. Por tanto, es imprescindible escoger los valores de los controladores PI de la turbina teniendo en

cuenta el número de turbinas que se vayan a conectar. En caso de realizar, por ejemplo, una ampliación de un parque, se puede usar la herramienta para valorar si se deben modificar los valores de dichos parámetros o si se pueden mantener los que existen.

Finalmente, cabe señalar que, con el diseño de la interfaz gráfica, se facilita aún más el procedimiento de análisis ya que ésta hace que el proceso de cálculo sea muy sencillo y que no sea necesario tener conocimientos específicos para poder usar los programas.

7.2 LÍNEAS FUTURAS

El presente trabajo se ha centrado en el estudio de la estabilidad del lazo de corriente del convertidor de conexión a red. Por ello, parece natural como línea de desarrollo futura, la incorporación en el análisis el resto de lazos de control y etapas de potencia de la estructura de conversión del lazo de tensión en la presente herramienta. En particular, el lazo de control de corriente analizado forma parte de uno más externo que regula la tensión del bus de continua de la estructura Back to Back de la etapa de potencia. Ambos lazos están en cierto modo desacoplados, dado que el lazo de tensión tiene una frecuencia de corte muy inferior. No obstante, integrar el análisis de ambos lazos en la misma herramienta proporcionaría un entorno compacto y muy completo de cara a estudiar la estabilidad de la conexión a red de la etapa de conversión, incluso en circunstancias en las que el desacoplamiento de ambos lazos pudiera no ser tan fuerte. Para ello, se debería calcular la función de transferencia del lazo de corriente en lazo cerrado y añadir los elementos propios del lazo de tensión, incluyendo los filtros o retrasos de adquisición de la etapa de sensado. Siguiendo la filosofía anterior, esta herramienta también se podría utilizar para sintonizar los controladores del lado máquina. Se deberían modificar los parámetros introducidos y las funciones de transferencia, pero el procedimiento de cálculo sería el mismo. En el modelado de la etapa de conversión del lado máquina hay que incorporar el lazo de control de potencia así como la particular dinámica de la impedancia de conexión. En este sentido habrá que estimar si parámetros como las capacidades del filtro dv/dt o las elevadas capacidades parásitas del generador son relevantes o no para el estudio de estabilidad. Una vez definido el modelo, se podría usar la herramienta de cálculo propuesta en este trabajo para analizar dicha etapa de potencia y sintonizar todos los controladores utilizados.

Sin duda, un aspecto relevante, no ya en cuanto a la técnica de cálculo o la flexibilidad para introducir los diferentes parámetros del sistema, es la validación de los resultados obtenidos frente a medidas experimentales. Un aspecto decisivo para validar el modelado del sistema y el criterio de análisis de estabilidad elegido, que no se ha podido llevar a cabo en estos meses. Para ello habría que obtener registros reales en los que se observen los valores de K_p y T_n utilizados y de los márgenes de estabilidad, y comprobar que los resultados teóricos proporcionados por la herramienta sean acordes a los obtenidos en la realidad.

A raíz de las conclusiones que se obtengan en la validación experimental de la herramienta se podría derivar la necesidad de una mejora en el modelado del sistema. Una modificación de este tipo sería fácil de incorporar en la herramienta propuesta. De hecho, la dificultad será, como es habitual, identificar qué características del actual modelado de los componentes se han pasado por alto y deberían incorporarse de forma que se reduzcan las discrepancias con las medidas experimentales. En este sentido, los diagramas de bode calculados por la herramienta podrían ayudar en el proceso de identificación.

Finalmente, cabe señalar que, si bien el estudio de la conexión de varias turbinas en paralelo ha sido incorporado a la herramienta, existe un gran interés actual por el análisis preciso de dicha integración lo que probablemente se deriven en nuevos modelos. Como consecuencia, dichos modelos deberán ser incorporados en la herramienta, junto con las posibles técnicas específicamente desarrolladas para evaluar el grado de estabilidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [AS3916] Análisis de la estabilidad en ejes alpha-beta basado en MATLAB-Simpower de IPT.
- [CHA06] Charles Sao, Peter W. Lehn., "A Block Diagram Approach To Reference Frame Transformation Of Converter Dynamic Models." IEEE, University of Toronto: IEEE, 2006.
- [EPM16] Apuntes de la asignatura de Electrónica de Potencia del Máster de Ingeniería Industrial, 2016.
- [FWI09] Formación I+D Wind Ingeteam
- [GOM11] Gómez Yepes A., "Digital Resonance Current Controllers For Voltage Source Converters", Vigo, 2011
- [GWEC15] Global Wind Energy Council, 2015.
- [HON99] Hong-seok Song, Kwanghee Nam, "Dual Current Control Scheme for PWM Converter Under Unbalanced Input Voltage Conditions". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, Oct 1999.
- [JUA14] Juancorena X., "Conversión de Energía en Generadores Eólicos con MSIP de Gran Potencia." Tesis doctoral, Pamplona, 2014.
- [MAT14] MATLAB R2014b, Mathworks Inc., 2014.
- [SVE07] Svensson, J.; Bongiorno, M.; Sannino, A., "Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 18-26, Jan. 2007.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potencia acumulada mundial de energía eólica	9
Figura 2. Configuración Full Converter.....	9
Figura 3. Sistema completo formado por un sistema continuo y otro discreto	10
Figura 4. Configuración Full Converter de un sistema trifásico (partes)	12
Figura 5. Sistema de lado red (Simpower, Simulink)	13
Figura 6. Sistema lado red simplificado.....	14
Figura 7. Sistema físico y control del lado red.....	15
Figura 8. Ejes de referencia abc y alpha-beta	16
Figura 9. Ejes de referencia alphabeta y dq	17
Figura 10. Secuencia directa e inversa	19
Figura 11. Filtro DSC de cuarto de periodo	20
Figura 12. Desarrollo vectorial del filtro DSC ₄	21
Figura 13. Control dual de corrientes	21
Figura 14. Modelado de una capacidad en dq	22
Figura 15. Modelado del sistema físico en ejes dq.....	23
Figura 16. Transformación de un sistema de referencia a otro.....	23
Figura 17. Modelo unifilar del sistema eléctrico de potencia en RST.....	26
Figura 18. Margen de fase y de ganancia	27
Figura 19. Representación de Kp y Tn frente al margen de fase a una frecuencia de corte concreta.....	31
Figura 20. Modelo de simulación formado por la planta, el controlador y el retardo de control	32
Figura 21. Parejas de parámetros escogidas para Tn positivo (izquierda) y negativo (derecha) ..	32
Figura 22. Corriente medida y consigna en d para Tn positivo (izquierda) y negativo (derecha) .	33
Figura 23. Representación de Kp y Tn óptimos.....	33
Figura 24. Diagrama de bode del sistema en lazo abierto para los valores de Kp y Tn óptimos.	34
Figura 25. Ejemplo de un sistema con varios puntos de cruce con el eje de ganancia 0.....	35
Figura 26. Zoom del diagrama de Bode anterior	36
Figura 27. Diagrama de Nyquist de la función en lazo abierto del sistema	37
Figura 28. Valores de Kp y Tn para los cuales falla dicho cálculo	38
Figura 29. Diagrama de Bode en el que se observan los parámetros de estabilidad reales	38
Figura 30. Valores de Kp y Tn obtenidos para la validación del método analítico	39
Figura 31. Corriente en el eje d obtenida por simulación.....	40
Figura 32. Diagrama de flujo del proceso de registro de valores válidos y óptimos de Kp y Tn ...	41
Figura 33. Gráfica para obtener los valores máximos de Kp y Tn	42
Figura 34. Diagrama de flujo del proceso iterativo de cálculo de Kp y Tn óptimos	44

Figura 35. Margen de fase en función de los valores de Kp y Tn.	46
Figura 36. Margen de ganancia en función de los valores de Kp y Tn.	47
Figura 37. Ancho de banda en función de los valores de Kp y Tn.	47
Figura 38. Ancho de banda en función de los valores de Kp y Tn válidos	48
Figura 39. Ancho de banda en función de los valores de Kp y Tn válidos (1).....	49
Figura 40. Valor del ancho de banda para cada pareja de Kp y Tn válidos(2).....	50
Figura 41. Diagrama de Bode del lazo abierto- secuencia directa.....	51
Figura 42. Diagrama de Bode del lazo cerrado-secuencia directa	51
Figura 43. Diagrama de Bode del lazo abierto-secuencia directa.....	52
Figura 44. Diagrama de Bode del lazo cerrado,-secuencia directa e inversa.	53
Figura 45. Corriente en d obtenida al considerar los parámetros calculados con el método iterativo	54
Figura 46. Corrientes normales y corriente cruzada diferencial de un sistema formado por dos turbinas en paralelo	55
Figura 47. Modelo unifilar equivalente para la corriente normal	56
Figura 48. Modelo unifilar equivalente para la corriente cruzada diferencial.....	56
Figura 49. Diagrama de Bode en lazo cerrado del sistema con varias turbinas.....	57
Figura 50. Modelo unifilar equivalente para la corriente cruzada diferencial (Simpower).....	58
Figura 51. Modelo unifilar equivalente para la corriente normal (Simpower)	59
Figura 52. Diagrama de Bode obtenido al conectar 1, 20 y 40 turbinas	60
Figura 53. Diagrama de flujo del cálculo del número máximo de turbinas a conectar	61
Figura 54. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz gráfica.....	63
Figura 55. Interfaz gráfica de la herramienta de sintonización de lazos de control.	65
Figura 56. Cuadro de la interfaz con las diferentes opciones posibles.	66
Figura 57. Interfaz gráfica visualizada al elegir la tercera opción.	67
Figura 58. Cuadro correspondiente al cálculo de parámetros con secuencia directa.	68
Figura 59. Solución obtenida en la primera opción posible.	68
Figura 60. Diagramas de Bode en LA (izquierda) y LC (derecha) para la secuencia directa de una sola turbina.	69
Figura 61. Cuadro correspondiente al cálculo de parámetros con secuencia directa e inversa. ..	69
Figura 62. Solución obtenida en la segunda opción posible	69
Figura 63. Diagrama de Bode obtenido en la 2ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)	70
Figura 64. Ventana de introducción de datos que aparece al elegir la tercera opción.	70
Figura 65. Ventana que aparece para cambiar los límites del margen de fase y de ganancia.....	70
Figura 66. Cuadro de error que aparece si no se pueden conectar turbinas en paralelo.....	71
Figura 67. Solución obtenida en la tercera opción posible.	71
Figura 68. Diagrama de Bode de interacción de una turbina con la red, obtenido en la 3ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)	72

Figura 69. Diagrama de Bode de interacción entre turbinas, obtenido en la 3ª opción del programa (Lazo abierto a la izquierda, lazo cerrado a la derecha)	72
Figura 70. Ventana de introducción de datos que aparece al elegir la cuarta opción	73
Figura 71. Solución obtenida para conectar 12 turbinas, en la cuarta opción posible.....	73
Figura 72. Solución obtenida para conectar 20 turbinas, en la cuarta opción posible.....	73
Figura 73. Cuadro de error que aparece si no se pueden conectar ese número de turbinas en paralelo.....	74
Figura 74. Solución obtenida teniendo como límites 60° y 6 dB, en la quinta opción posible.	74
Figura 75. Solución obtenida teniendo como límites 45° y 3 dB, en la quinta opción posible.	74