

Tema IV: Régimen sinusoidal permanente

1 Consideraciones generales

El análisis del comportamiento de un circuito sometido a una excitación en la que hay una o varias componentes del tipo sinusoidal permanente (AC, *alternate current*, *corriente alterna*)¹ puede presentar distintas variantes, como son las que se indican seguidamente.

- Análisis de un circuito sometido a una única excitación AC de frecuencia fija y conocida (análisis fasorial).
- Repetición del análisis fasorial para distintas excitaciones, cada una de las cuales está caracterizada por el mismo módulo y la misma fase pero por distinta frecuencia que las restantes. El problema se resuelve suponiendo que sólo una excitación es aplicada cada vez. Los resultados obtenidos constituyen la respuesta en frecuencia del circuito.
- Análisis de un circuito en el que están presentes simultáneamente distintas excitaciones (superposición), que pueden ser continuas y/o sinusoidales.

En este tema nos ocuparemos del primero de los tipos de análisis que acabamos de mencionar, dejando la consideración de los dos restantes para temas sucesivos. Antes de comenzar con las características específicas del análisis fasorial conviene precisar que, en lo que se refiere al mismo, continúan siendo válidas muchas de las consideraciones efectuadas en temas precedentes, como son las relativas a elementos pasivos, incluyendo denominaciones y valores (no se indican valores iniciales para inductancias y capacidades), fuentes dependientes, posicionamiento de los elementos en el área de dibujo de la pantalla principal de *Schematics* o utilización de los prefijos identificativos de unidades².

2 Elementos específicos del análisis fasorial

La figura IV.1 resume los elementos específicos que se utilizan para representar en PSpice circuitos que han de ser sometidos a análisis fasorial. Como puede observarse, se trata de dos fuentes independientes (una de tensión y otra de corriente) y tres medidores (uno de corriente y dos de tensión).

Ambas fuentes se caracterizan como sendos fasores; es decir, proporcionando los valores de sus módulos y fases en un cuadro como el mostrado en la figura IV.1. La fase se expresa en grados sexagesimales. Obsérvese que las fuentes podrían incorporar también una componente continua. Sin embargo, en este tema no consideraremos tal opción, con lo que el parámetro DC

¹ La denominación AC para designar una señal sinusoidal significa que la polaridad y el sentido de la corriente de aquélla cambian en cada ciclo de la señal. Desde este punto de vista, la denominación es incorrecta, ya que existen muchas otras señales en las que se produce la misma situación y no tienen una variación sinusoidal con el tiempo. Sin embargo, es muy habitual en la práctica asignar tal denominación al régimen sinusoidal permanente.

² Aunque no se indicó explícitamente, los valores correspondientes a las fuentes DC aludidas en los temas II y III pueden ser expresados utilizando la notación representada en la figura I.10 y lo mismo es aplicable a los contenidos del presente tema.

ha de tener un valor de 0 V. Téngase en cuenta que, en la fuente de corriente, se supone que ésta entra en el elemento por el extremo marcado con un signo más. Las fuentes de corriente no pueden estar directamente en serie con elementos reactivos (inductancias y capacidades). Esta situación se evita disponiendo en paralelo con la fuente una resistencia de valor muy elevado. Circunstancias similares pueden darse en el caso de fuentes de tensión en serie con elementos reactivos; en dicha situación hay que utilizar resistencias de muy pequeño valor. Las expresiones *muy elevado* y *muy pequeño* se formulan en comparación con las impedancias que presentan los restantes elementos del circuito.

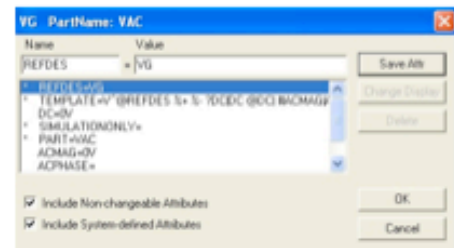
Elementos usados en PSpice para análisis fasorial AC

	VAC	fuentes independiente de tensión sinusoidal
	IAC	fuentes independiente de corriente sinusoidal
	IPRINT	medidor de corriente (amperímetro) sinusoidal
	VPRINT1	medidor de tensión sinusoidal (voltímetro) de un punto con relación a tierra
	VPRINT2	medidor de tensión sinusoidal (voltímetro) entre dos puntos

Estos elementos operan como fasores (módulo y fase, partes real e imaginaria)

ELEMENTOS ESPECÍFICOS

CARACTERÍSTICAS DE UNA FUENTE



CARACTERÍSTICAS DE UN MEDIDOR



Figura IV.1. Elementos típicos de representaciones de circuitos funcionando en AC (análisis fasorial) en PSpice.

Uno de los medidores de tensión (VPRINT1) permite obtener la tensión en un punto (o, lo que es equivalente y más exacto, la diferencia de tensión entre dicho punto y el nudo de tierra); en consecuencia, un medidor de este tipo se dispone sobre un nudo del circuito. El otro medidor de tensión permite obtener la diferencia de tensión entre dos puntos y ha de estar en paralelo con otro elemento (u otros elementos) que se encuentre conectado a los mismos dos puntos. El amperímetro permite determinar la corriente que circula por una rama del circuito, y ha de disponerse en serie con los restantes elementos incluidos en dicha rama.

Las características de los medidores se establecen mediante un cuadro de diálogo como el mostrado en la figura IV.1. En él se indica cómo desea el usuario que se presenten los

resultados: incluyendo o no la componente continua, incluyendo o no la componente sinusoidal, incluyendo o no la componente transitoria, valores expresados en coordenadas cartesianas (partes real e imaginaria) o polares (módulo y fase), etcétera. La activación de una forma concreta de expresar los resultados se hace asignando un valor 1 al parámetro correspondiente; en caso contrario se asigna un valor nulo a dicho parámetro. En la situación contemplada en este tema siempre asignaremos valores nulos a los parámetros DC= y TRAN; es decir, nos limitaremos a un análisis en régimen sinusoidal permanente, prescindiendo de la consideración de cualquier otro tipo de régimen que pudiera estar presente en el circuito.

3 Análisis fasorial de un circuito sometido a una excitación AC

La figura IV.2 resume el proceso a seguir para realizar un análisis fasorial en un circuito sometido a una excitación AC. Algunas observaciones sobre el mismo son las que se indican seguidamente.

Análisis fasorial de circuitos bajo excitación AC

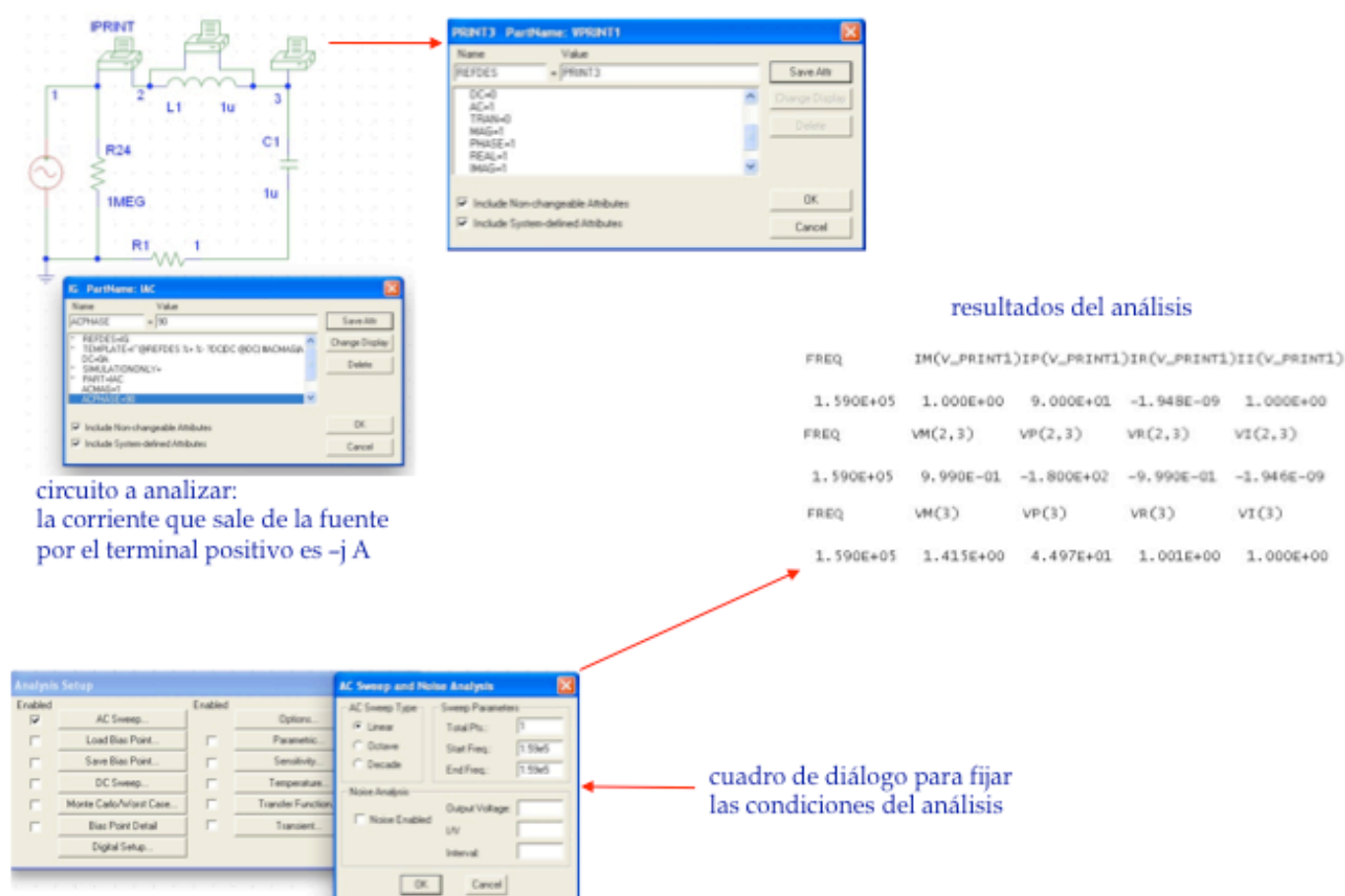


Figura IV.2. Condiciones del análisis fasorial en un circuito sometido a una excitación AC.

- La resistencia R24 no se encontraba originalmente en el circuito. Ha debido ser introducida para evitar que la fuente quede directamente en serie con elementos reactivos.
- Obsérvese que R24 tiene un valor muy elevado ($1\text{ M}\Omega$) comparado con las otras impedancias presentes en el circuito, que son del orden de $1\ \Omega$. Puede comprobarse (cambiando el valor de R24) que esta diferencia tan grande de órdenes de magnitud hace que la influencia de la resistencia en el conjunto del circuito sea prácticamente despreciable.
- Si se desea, como es el caso, que la corriente entregada por la fuente al resto del circuito sea $-j\text{ A}$, el valor de la fase indicado para aquélla ha de ser 90° . De esta forma, a la fuente le corresponde una corriente de $1_{<90^\circ} = j\text{ A}$. Ahora bien, como se ha indicado en la sección anterior, PSpice trata dicha corriente como si estuviera entrando en la fuente por el terminal marcado por el signo más. La corriente saliente de la fuente por dicho terminal tendrá un signo opuesto; es decir, saldrá una corriente de $-j\text{ A}$, tal y como se pretendía.
- Pese a que se está haciendo referencia a un tipo de análisis basado en el uso de fasores e impedancias, PSpice opera siempre con los valores reales de los elementos pasivos; de ahí que sean éstos los que aparecen en el esquema del circuito. PSpice multiplica internamente tales valores por la frecuencia angular de operación que está considerando en cada momento para obtener los valores de las impedancias.
- Las condiciones del análisis se fijan seleccionando la opción *AC Sweep* en el menú *Analysis Setup*, el cual puede ser activado a través de la botonera. En el cuadro de diálogo se seleccionan el tipo de variación de la frecuencia (siempre *Linear* si se está haciendo referencia a análisis fasorial), el número de valores de frecuencia (*Total Pts.*; se indica 1 si se hace referencia a un análisis fasorial a una única frecuencia) y el rango de variación de la frecuencia. De haberse indicado más de un punto, el análisis se repetiría para cada uno de ellos. La frecuencia de cada punto se obtendría distribuyendo el intervalo de frecuencias entre el número de valores; en este caso sí sería posible indicar análisis por décadas o por octavas.
- Obsérvese que los valores de frecuencia son normales (es decir, expresados en Hz) y no corresponden a frecuencias angulares. Las correspondientes frecuencias angulares son obtenidas por el programa multiplicando las normales por el factor 2π .

Una vez concluido el análisis y cerrado el módulo *Probe*, que se activa automáticamente al concluir aquél, el usuario puede consultar los resultados obtenidos eligiendo la opción *Examine Output* en el menú *Analysis* disponible en la barra de comandos de la pantalla principal de *Schematics*. Dicha opción, además de mucha otra información, proporciona los resultados mostrados en la figura IV.2. A propósito de tales resultados pueden formularse las siguientes observaciones:

- Se indican los valores que tienen las magnitudes de interés (corrientes, tensiones) a la frecuencia considerada. Tales valores son obtenidos en los correspondientes medidores.
- El programa trata al medidor de corriente como si fuera una fuente de tensión independiente de valor nulo.

- Cada magnitud se expresa tanto en módulo (I_M , V_M) y fase (I_P , V_P), como en forma cartesiana (I_R , V_R ; I_I , V_I). Esta diversidad de opciones ha sido impuesta por el usuario en los distintos cuadros de diálogo en los que ha establecido las características de los medidores.
- Los valores de tensiones van asociados a los nudos en los que se miden dichas magnitudes. Esto hace que sea muy conveniente que sea el propio usuario quien numere los nudos del circuito. De lo contrario, lo hace el programa internamente y no siempre es fácil identificar a qué posiciones del circuito corresponden los números de nudos establecidos por aquél.
- Obsérvese que la tensión en el nudo 3 es la suma de las caídas de tensión en $C1$ y $R1$.
- El usuario ha de saber aproximar los valores obtenidos. Por ejemplo, tal y como puede verse en la figura IV.2, hay dos parámetros para los que se obtienen los valores de $-1.948E-09$ y $-1.946E-09$, respectivamente. Carece completamente de sentido que el usuario intente manejar estos resultados numéricos en la forma que acabamos de indicar; a cambio, lo más razonable es sustituir ambos por sendos valores nulos.

4 Utilización de transformadores en AC

Los efectos asociados a los fenómenos de inducción mutua aparecen en cualquier circuito en el que haya inductancias acopladas y en las que la corriente y/o la tensión varíen con el tiempo. En consecuencia, en principio pueden estar presentes en circuitos funcionando en AC (no lo están en circuitos funcionando en DC porque las magnitudes indicadas no varían con el tiempo). Los transformadores son elementos de cuatro terminales que, precisamente, hacen uso de tales efectos. Hay dos tipos de transformadores, tal y como se indica en la figura IV.3.

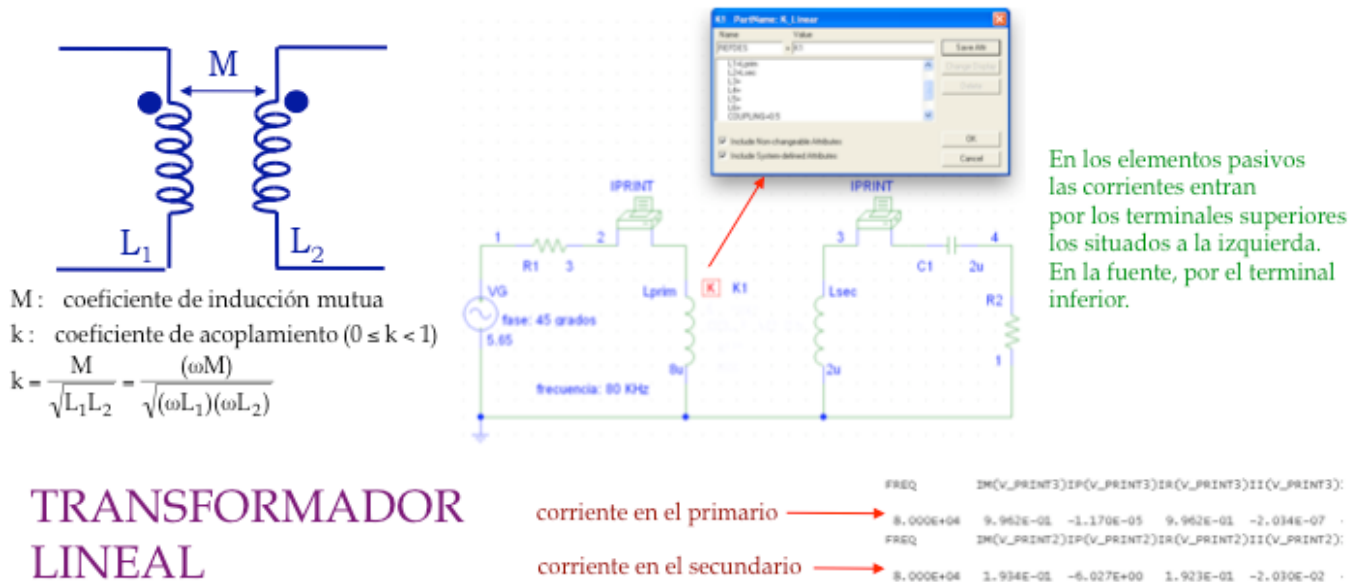
El primero de ellos es el transformador lineal. Se selecciona en la librería de elementos mediante el código `K_Linear`. Puede tratar hasta seis inductancias acopladas entre sí, aunque en este texto se considerarán únicamente transformadores formados por dos elementos. En el cuadro de diálogo correspondiente al elemento se indican los nombres de las inductancias afectadas. Éstas se disponen en el circuito como cualquier otra inductancia, realizando las acciones necesarias para asignar los nombres y los valores especificados. En el citado cuadro de diálogo se indica también el coeficiente de acoplamiento (no el coeficiente de inducción mutua que suele emplearse en la teoría).

En el dibujo mostrado en la figura IV.3 los textos relativos a la fase de la fuente y a la frecuencia de operación han sido escritos utilizando un icono incluido en la botonera de la pantalla principal. A la hora de abrir el cuadro de diálogo relativo a la inducción mutua (como ocurre en los casos de otros elementos) desaparecen momentáneamente de la pantalla más indicaciones sobre el elemento. El conjunto de las indicaciones ha de disponerse sobre el área de dibujo de modo que no toque a ningún otro elemento; de lo contrario podrían producirse errores en el análisis.

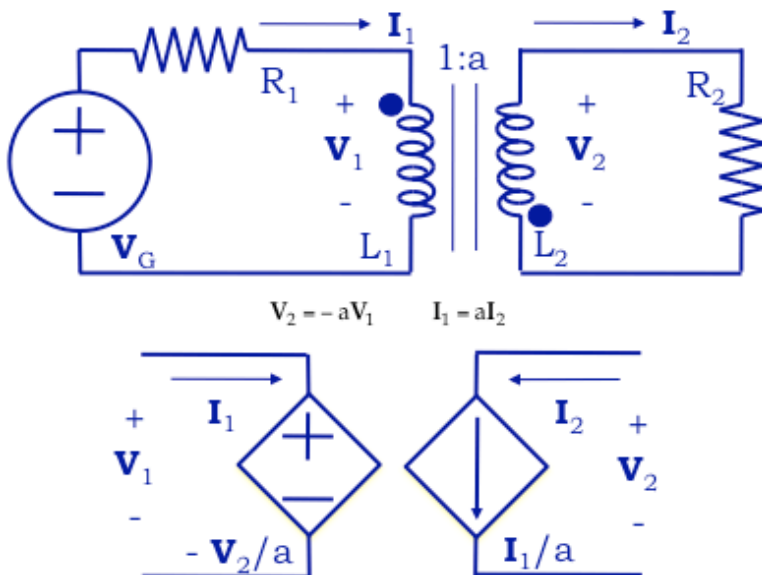
El otro transformador considerado en este texto es el ideal. PSpice no incluye ningún elemento que pueda simularlo exactamente de acuerdo con lo expuesto en la teoría de esta materia. A cambio puede representarse utilizando dos fuentes dependientes de forma que cada

una de ellas se ajuste a una de las ecuaciones que definen dicho tipo de transformador; esto es precisamente lo que se hace en la figura IV.3. Naturalmente, las ganancias de las fuentes dependientes tienen el valor 1/a (con signo menos cuando proceda).

Tratamiento de transformadores en AC con PSpice



TRANSFORMADOR LINEAL



TRANSFORMADOR IDEAL

Las corrientes entran en las resistencias por sus terminales izquierdos. Se ha asignado un valor de 2 (a) a la relación de espiras.

FREQ	VM(3)	VP(3)	VR(3)	VS(3)
1.590E+07	1.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
FREQ	VM(2)	VP(2)	VR(2)	VS(2)
1.590E+07	2.000E+00	1.800E+02	-2.000E+00	0.000E+00

Figura IV.3. Tratamiento de los transformadores lineal e ideal en PSpice.

Si en todo momento hay que prestar una atención especial al correcto posicionamiento de los elementos en el área de dibujo (es decir, a la determinación del extremo de un elemento por

el que entra la corriente), esta circunstancia es todavía más exigente en el caso de los transformadores. En la teoría se marca con un punto un extremo de cada una de las inductancias afectadas por un fenómeno de inducción mutua. Las posiciones relativas de los puntos en las inductancias condicionan que los signos sean más o menos en las ecuaciones representativas del comportamiento del circuito. Pues bien, el extremo marcado con un punto coincide, precisamente, con aquél por el que entra la corriente en la bobina cuando dibujamos ésta en PSpice.

5 Ejercicios propuestos

La figura IV.4 incluye dos problemas propuestos. Se sugiere al lector que intente resolverlos para comprobar su grado de asimilación de los contenidos incluidos en secciones anteriores.

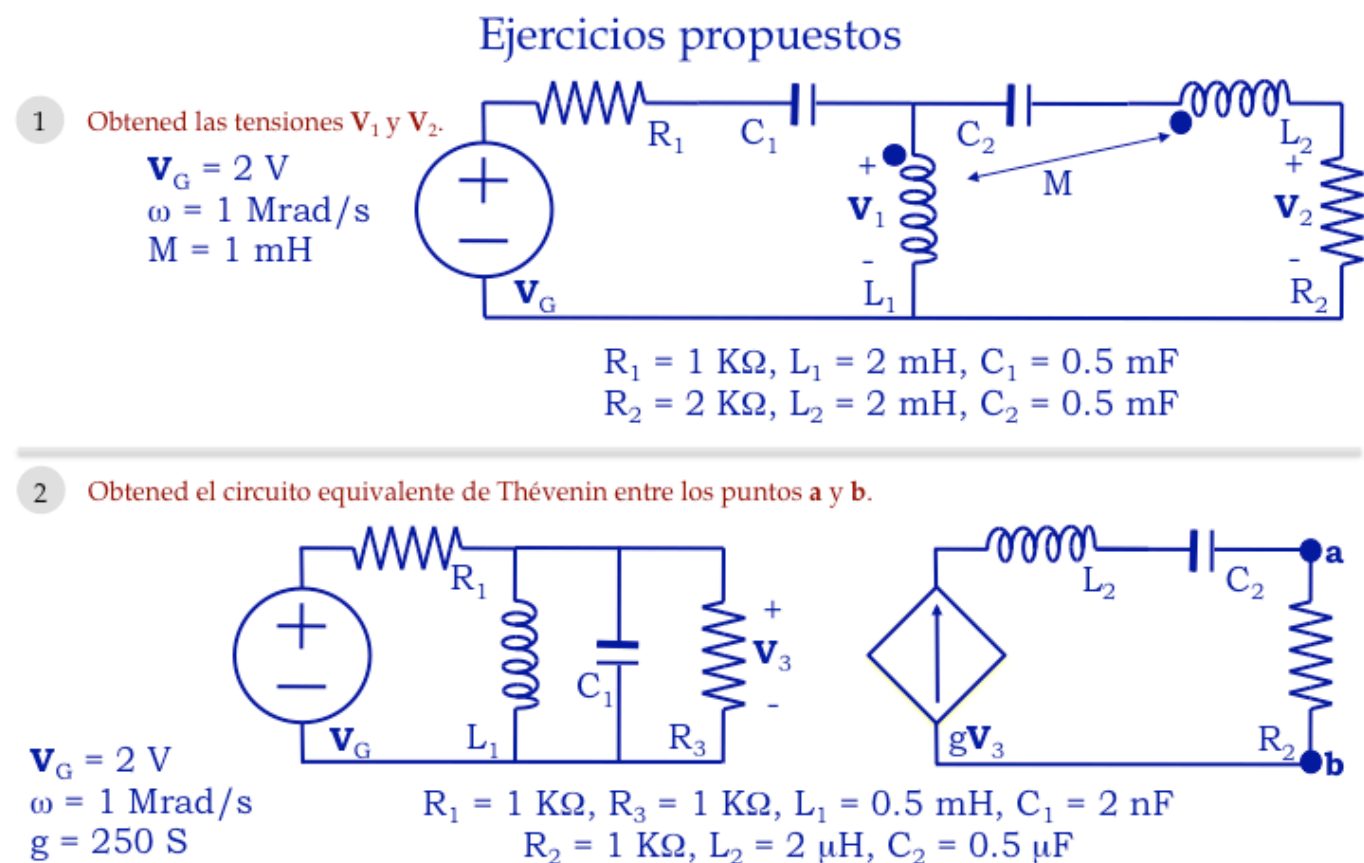


Figura IV.4. Ejercicios para comprobar la capacidad de resolver problemas relativos a análisis fasorial.