

Ángulo de fase y desfase

OBJETIVO DEL EJERCICIO

Cuando usted haya completado este ejercicio, sabrá qué es el ángulo de fase y cómo éste modifica el desplazamiento inicial de una onda sinusoidal. Además, será capaz de determinar el desfase entre dos ondas sinusoidales, comparando sus ángulos de fase o determinando su separación en el tiempo. También sabrá cómo distinguir un desfase en adelanto de uno en retraso.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Ángulo de fase
- Desfase

PRINCIPIOS

Ángulo de fase

Cómo se ha visto en el ejercicio 1-1, la representación gráfica de una onda sinusoidal puede ser expresada con la siguiente ecuación:

$$a(t) = A \operatorname{sen}(\omega t) \quad (1-8)$$

donde

$a(t)$	es el valor instantáneo de la onda sinusoidal en el instante t .
A	es la amplitud de la onda sinusoidal.
ω	es la velocidad angular, expresada en radianes por segundo (rad/s).
t	es el tiempo, expresado en segundos (s).

En la ecuación se asume que el ciclo de la onda sinusoidal comienza en el instante en que $t = 0$ (como se muestra en la figura 1-10). Como verá más adelante, este no es siempre el caso. Para representar la posición inicial de la onda sinusoidal, se introduce la noción de **ángulo de fase** θ en la siguiente ecuación:

$$a(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \quad (1-9)$$

donde θ es el ángulo de fase de la onda sinusoidal, expresado en grados (°) o radianes (rad).

De la ecuación (1-9), es fácil observar que el valor inicial (es decir, el valor en el que $t = 0$) de la onda sinusoidal depende solamente del ángulo de fase θ porque el término ωt es igual a 0 en $t = 0$. En otras palabras, el ángulo de fase θ determina en cuánto una onda sinusoidal difiere de 0 en el tiempo $t = 0$ y, por lo tanto, da la posición de dicha onda en el tiempo.

La figura 1-10 muestra una onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de 0° . El valor inicial de esta onda sinusoidal es 0 porque $A \sin(\omega \cdot 0 + 0) = 0$. Esta onda es idéntica a las presentadas en el ejercicio 1-1, pues el valor de 0° del ángulo de fase estaba implícito por la ausencia de θ en las ecuaciones del ejercicio 1-1.

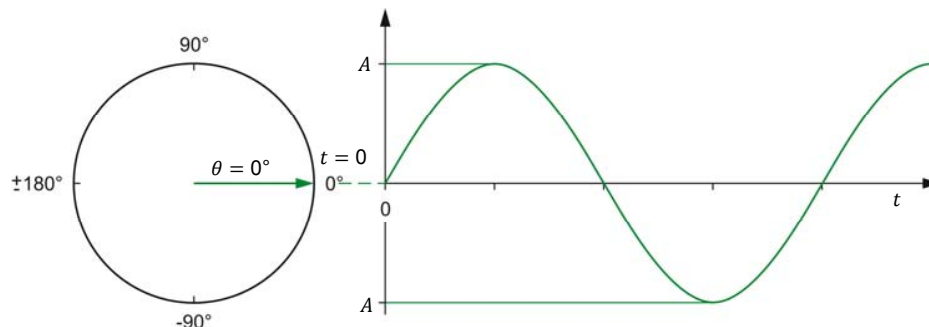


Figura 1-10. Onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de 0° .

La figura 1-11 muestra una onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de 45° . Se puede apreciar en la figura que un ángulo de fase positivo (0° a 180°) resulta en una onda sinusoidal con un valor instantáneo en $t = 0$ positivo. En otras palabras, un ángulo de fase positivo desplaza la onda sinusoidal hacia la izquierda, es decir, avanza en el tiempo a la onda sinusoidal.

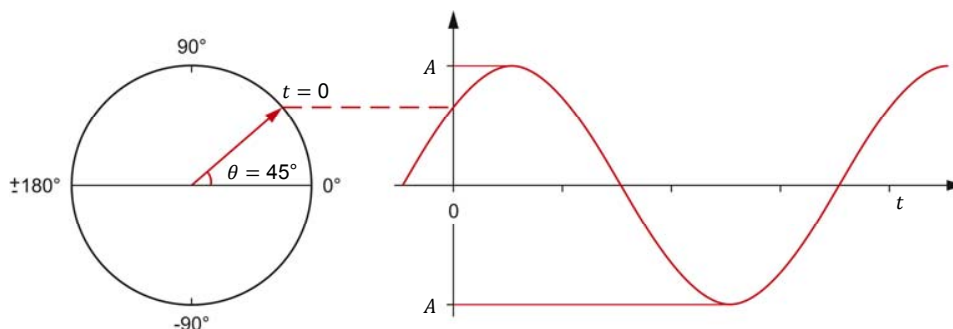


Figura 1-11. Onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de 45° .

La figura 1-12 muestra una onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de -60° . Un ángulo de fase negativo (0° a -180°) resulta en una onda sinusoidal con un valor instantáneo negativo en $t = 0$. En otras palabras, un ángulo de fase negativo desplaza la onda sinusoidal hacia la derecha, es decir, atrasa en el tiempo a la onda sinusoidal.

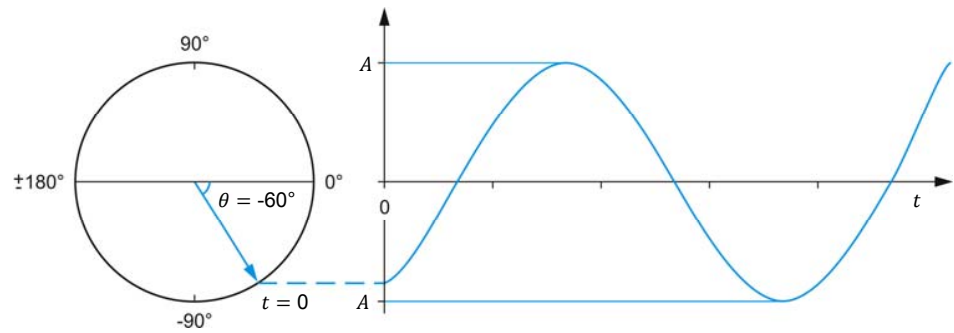


Figura 1-12. Onda sinusoidal con un ángulo de fase θ de -60° .

De la figura 1-10 a la figura 1-12 se muestran las representaciones fasoriales de las ondas sinusoidales en $t = 0$. Note que en cada figura la distancia vertical entre la punta del fasor y el eje horizontal es igual al valor instantáneo de la onda sinusoidal en $t = 0$.

Desfase

Al comparar dos ondas sinusoidales de la misma frecuencia, la diferencia entre sus ángulos de fase se denomina **desfase** y se expresa en grados ($^\circ$) o radianes (rad). La magnitud del desfase indica el grado de separación en el tiempo entre las dos ondas sinusoidales, mientras que la polaridad del desfase (positivo o negativo) indica la relación en el tiempo entre las dos ondas (en **adelanto** o **retraso**). La amplitud de la onda sinusoidal no tiene efecto en el desfase, pues éste no cambia el periodo ni la frecuencia de dicha onda. Las ondas sinusoidales de frecuencias distintas, y por lo tanto periodos diferentes, no se pueden comparar utilizando sus ángulos de fase pues sus ciclos no se corresponden.

El desfase entre dos ondas sinusoidales se expresa como un ángulo que representa una porción de un ciclo completo de las dos ondas. Una de esas ondas se usa como referencia en la medición del desfase. Éste se calcula al sustraer el ángulo de fase $\theta_{Ref.}$ correspondiente a la onda sinusoidal de referencia del ángulo de fase θ de la onda de interés. La ecuación escrita sería:

$$\text{Desfase} = \theta - \theta_{Ref.} \quad (1-10)$$

donde θ es el ángulo de fase de la onda sinusoidal de interés, expresado en grados ($^\circ$) o radianes (rad).
 $\theta_{Ref.}$ es el ángulo de fase de la onda sinusoidal de referencia, expresado en grados ($^\circ$) o radianes (rad).

La figura 1-13 es un ejemplo que muestra cómo se calcula el desfase entre dos ondas sinusoidales (X e Y) usando sus ángulos de fase.

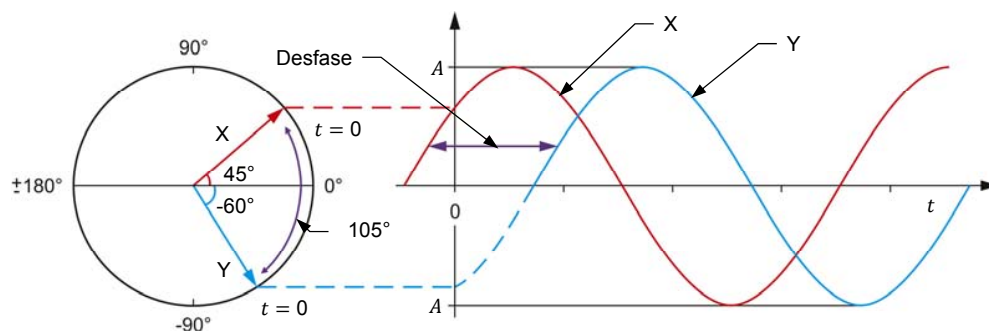


Figura 1-13. Desfase entre dos ondas sinusoidales con ángulos de fase de 45° y -60° .

En esta figura, la onda sinusoidal X tiene un ángulo de fase θ de 45° , mientras que la onda Y tiene un ángulo de fase θ de -60° . Dependiendo de qué onda sea utilizada como referencia, el desfase puede ser $+105^\circ$ o -105° . Cuando la onda sinusoidal X es la referencia, el desfase de la onda Y respecto a la onda X es -105° ($-60^\circ - 45^\circ = -105^\circ$). El signo negativo del desfase indica que la onda sinusoidal Y está en retraso respecto a la onda sinusoidal X. Por esta razón, este valor de desfase se expresa también como 105° en retraso. A la inversa, si la onda sinusoidal Y es la referencia, el desfase de la onda X respecto a la onda Y es $+105^\circ$ ($45^\circ - (-60^\circ) = +105^\circ$). El signo positivo del desfase indica que la onda sinusoidal X está en adelante respecto a la onda sinusoidal Y. Por esta razón, este valor de desfase se expresa también como 105° en adelante. Observe que cuando dos ondas sinusoidales tienen ángulos de fase distintos, el desfase no es cero y, por lo tanto, se dice que dichas ondas están desfasadas.

Es posible determinar el desfase entre dos ondas sinusoidales de la misma frecuencia sin conocer sus ángulos de fase θ . Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Desfase} = \frac{d}{T} \cdot 360^\circ = \frac{d}{T} \cdot 2\pi \text{ rad} \quad (1-11)$$

donde d es el intervalo de tiempo entre las ondas sinusoidales medido en un punto de referencia de cada una, expresado en segundos (s).
 T es el periodo de las ondas sinusoidales, expresado en segundos (s).

Esta ecuación muestra claramente la razón por la que no es posible calcular el desfase entre dos ondas sinusoidales de frecuencia f distinta, pues de acuerdo a la ecuación es necesario tener un periodo común T ($T = 1/f$) para que la ecuación sea válida.

Considere por ejemplo, las ondas sinusoidales mostradas en la figura 1-14. Usando la ecuación (1-11), el desfase entre las dos ondas es igual a:

$$\text{Desfase} = \frac{d}{T} \cdot 360^\circ = \frac{3,33 \text{ ms}}{20,0 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = 60^\circ$$

Cuando la onda sinusoidal 1 es considerada la referencia, el desfase es en retraso porque la onda sinusoidal 2 está retrasada respecto a la onda sinusoidal 1. A la inversa, cuando la onda sinusoidal 2 es la referencia, el desfase es en adelante porque la onda sinusoidal 1 está adelantada respecto a la onda sinusoidal 2.

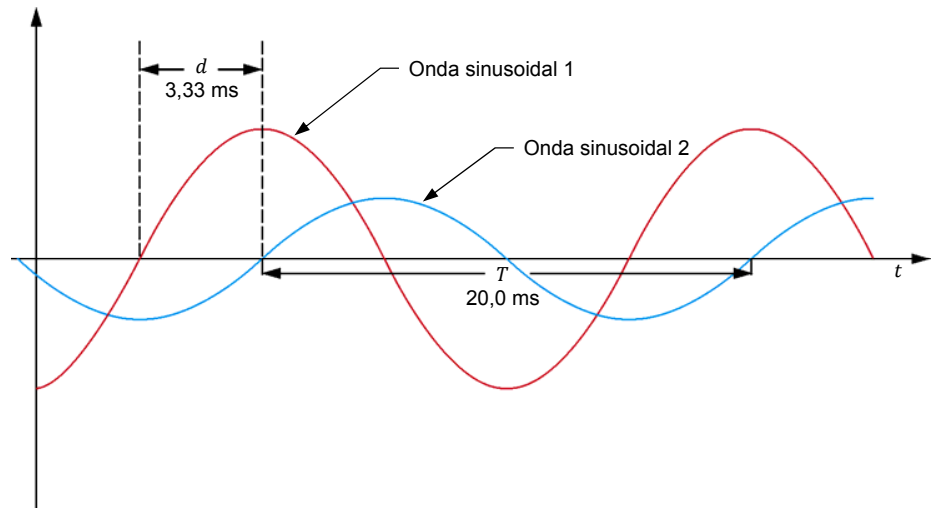


Figura 1-14. Desfase entre dos ondas sinusoidales de la misma frecuencia.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento se divide en las siguientes secciones:

- Montaje y conexiones
- Medición del desfase entre dos ondas de tensión sinusoidales en un circuito resistor-inductor (RL)
- Medición del desfase entre dos ondas de tensión sinusoidales en un circuito resistor-condensador (RC)

PROCEDIMIENTO

⚠ ADVERTENCIA



Durante este ejercicio de laboratorio estará en presencia de tensiones elevadas. No realice ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana en los circuitos bajo tensión, salvo indicación contraria.

Montaje y conexiones

En esta sección, conectará un circuito ca compuesto por un inductor y un resistor conectados en serie, y configurará el equipo necesario para medir la tensión de la fuente E_F y la tensión a través del resistor E_R .

1. Consulte la tabla de utilización del equipo del Apéndice A con el fin de obtener la lista del material necesario para realizar este ejercicio.

Instale el equipo necesario en el **Puesto de trabajo**.

2. Asegúrese de que el interruptor de alimentación principal del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** esté en la posición **O** (apagado) y luego conecte la **Entrada de alimentación** a un tomacorriente ca.

Esto se refiere a las conexiones del equipo en físico.

Conecte la *Alimentación* de la *Interfaz de adquisición de datos y de control* a la fuente de alimentación de 24 V ca. Encienda la fuente de alimentación de 24 V ca.

3. Conecte el puerto USB de la *Interfaz de adquisición de datos y de control* a un puerto USB de la computadora.

Conecte el puerto USB del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* al puerto USB de la computadora.

4. Encienda el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* y luego ponga el interruptor *Modo de operación* en *Fuente de alimentación*.
5. Encienda la computadora y luego inicie el programa *LVDAC-EMS*.

En la ventana *Arranque de LVDAC-EMS*, asegúrese de que la *Interfaz de adquisición de datos y de control* y el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* hayan sido detectados. Asegúrese de que la función *Instrumentación computarizada* para la *Interfaz de adquisición de datos y de control* esté disponible. Además, seleccione la tensión y frecuencia que corresponden a la red ca local y luego haga clic en el botón *ACEPTAR* para cerrar la ventana *Arranque de LVDAC-EMS*.

6. Monte el circuito mostrado en la figura 1-15. Este circuito contiene un resistor R y un inductor L . Los inductores se estudian en la siguiente unidad de este manual.

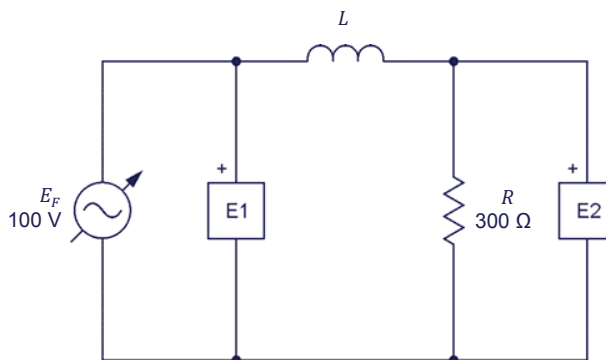


Figura 1-15. Circuito ca con un resistor y un inductor.

El valor del inductor L en el circuito de la figura 1-15 se conoce como inductancia y se expresa en henrios (H). El valor de la inductancia a utilizar depende de la frecuencia de la fuente de alimentación ca como se indica en la tabla 1-2.



Tal como se indica en el apéndice A, utilice el módulo *Carga inductiva*, modelo 8321, para obtener la inductancia requerida cuando la frecuencia de la red ca local es de 60 Hz. Utilice el módulo *Cargas inductivas y capacitivas*, modelo 8333, para obtener la inductancia requerida cuando la frecuencia de la red ca local es de 50 Hz.

Tabla 1-2. Valores de inductancia para las frecuencias de 50 y 60 Hz.

Frecuencia de la fuente (Hz)	Inductancia (H)
50	0,96
60	0,8

Ajuste los interruptores de la **Carga resistiva** y de la **Carga inductiva** (o de las **Cargas inductivas y capacitivas**) para obtener los valores de inductancia y resistencia requeridos.



El Apéndice C de este manual contiene las configuraciones de interruptores de la **Carga resistiva** y de la **Carga inductiva** para obtener diferentes valores de resistencia e inductancia.

Utilice las entradas **E1** y **E2** de la **Interfaz de adquisición de datos y de control** para medir la tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R , respectivamente.



7. En el programa **LVDT-EMS**, abra la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** y luego haga los ajustes siguientes:

- Ajuste el parámetro **Función** como **Fuente de alimentación ca.**
- Asegúrese de que el parámetro **Control de la tensión** esté ajustado en **Perilla**. Esto permite controlar manualmente la fuente de alimentación ca.
- Ajuste el parámetro **Tensión en vacío** en 100 V.
- Ajuste el parámetro **Frecuencia** a la misma frecuencia de la red ca local.
- No modifique los demás parámetros.

Medición del desfase entre dos ondas de tensión sinusoidales en un circuito resistor-inductor (RL)

En esta sección, utilizará el osciloscopio para observar las formas de onda (ondas sinusoidales) de la tensión de la fuente E_F y de la tensión del resistor E_R y determinará el desfase entre ambas. Luego, usando el Analizador de fasores, medirá el desfase entre el fasor de tensión de la fuente y el fasor de tensión del resistor, y lo comparará posteriormente con el desfase medido sobre las formas de onda de tensión.



Como lo verá más adelante, debido a la presencia del inductor en el circuito, la corriente del circuito está en retraso respecto a la tensión de la fuente. Como resultado de ello, la tensión del resistor E_R está desfasada respecto a la tensión de la fuente E_F .

8. En el programa **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Aparatos de medición**. Ajuste los medidores **E1** y **E2** para medir los valores rms de la tensión de la fuente E_F y de la tensión del resistor E_R , respectivamente.

En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, active la fuente de alimentación ca. Reajuste el valor del parámetro **Tensión en vacío** para que la tensión de la fuente de alimentación ca, E_F , (indicada por el medidor **E1** en la ventana **Aparatos de medición**) sea de 100 V.

9. En el programa **LVDAC-EMS**, abra el **Osciloscopio** de modo que se visualicen E_F (entrada **E1**) y E_R (entrada **E2**) en los canales 1 y 2, respectivamente. De ser necesario, ajuste la escala de tiempo para visualizar al menos dos ciclos de las ondas sinusoidales. Coloque los trazadores de ambos canales en la misma posición vertical.

10. Mida el periodo T de la tensión de la fuente E_F usando el **Osciloscopio** y luego Registre el valor a continuación.



Para obtener una medición precisa, se pueden utilizar los cursores verticales del **Osciloscopio** para medir el periodo o cualquier otro intervalo de tiempo.

Periodo $T =$ 16.6 ms

11. Mida el periodo T de la tensión del resistor E_R usando el **Osciloscopio** y luego Registre el valor a continuación.

Periodo $T =$ 16.61 ms

12. Compare el periodo T de la tensión del resistor E_R medido en el paso anterior con el periodo T de la tensión de la fuente E_F registrado en el paso 10. ¿Los valores son similares?

☒ Sí ☐ No

13. Usando el **Osciloscopio**, mida el intervalo de tiempo d entre las formas de onda de la tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R .

Intervalo de tiempo $d =$ 2.01 ms

14. Utilice la ecuación (1-11) para calcular el desfase entre la tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R . Considere la forma de onda de la tensión de la fuente como referencia.

Desfase = 43.59 °

15. ¿Está la tensión del resistor E_R , en adelanto o en retraso respecto de la tensión de la fuente E_F ?

16. En el programa LVDAC-EMS, abra el Analizador de fasores y visualice la tensión de la fuente E_F (entrada $E1$) y la tensión del resistor E_R (entrada $E2$). Ajuste el parámetro *Fasor de referencia* en $E1$. Mida los ángulos de fase θ_{EF} y θ_{ER} de los fasores de tensión.

Angulo de fase $\theta_{EF} = 0^\circ$

Angulo de fase $\theta_{ER} = -42.33^\circ$

A partir de estos valores, calcule el desfase entre los fasores de tensión de la fuente E_F y de la tensión del resistor E_R . Utilice el fasor de tensión de la fuente como referencia.

Desfase = 42.33°

17. Compare el desfase que determinó mediante las ondas sinusoidales de tensión con el medido a partir de los fasores de tensión correspondientes. ¿Los valores son similares?

☒ Sí ☐ No

Medición del desfase entre dos ondas de tensión sinusoidales en un circuito resistor-condensador (RC)

En esta sección, reemplazará el inductor utilizado en la sección anterior por un condensador. Utilizará el osciloscopio para determinar el desfase entre las dos ondas sinusoidales de tensión. Luego, mediante el Analizador de fasores, medirá el desfase entre el fasor de tensión de la fuente y el fasor de tensión del resistor y lo comparará con el desfase determinado a partir de las formas de onda de la tensión.



Como verá más adelante, debido a la presencia de un condensador en el circuito, la corriente del circuito se adelanta con respecto a la tensión de la fuente. Como resultado, la tensión del resistor E_R está desfasada respecto a la tensión de la fuente E_F .

18. En la ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, desactive la fuente de alimentación ca.

19. Modifique el circuito de la manera que se muestra en la figura 1-16 (reemplace el inductor por un condensador). Este circuito contiene un resistor R y un condensador C . Los condensadores se estudian en la siguiente unidad de este manual.

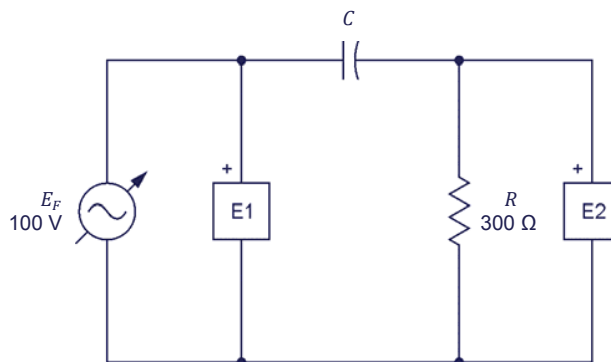


Figura 1-16. Circuito ca de un resistor y un condensador.

El valor del condensador C en el circuito de la figura 1-16 se llama capacitancia y se expresa en microfaradios (μF). El valor de la capacitancia que se utilice depende de la frecuencia de la fuente de alimentación ca como se indica en la tabla 1-3.



Tal como se indica en el apéndice A, utilice el módulo *Carga capacitiva*, modelo 8331, para obtener la capacitancia requerida cuando la frecuencia de la red ca local es de 60 Hz. Utilice el módulo *Cargas inductivas y capacitivas*, modelo 8333, para obtener la capacitancia requerida cuando la frecuencia de la red ca local es de 50 Hz.

Tabla 1-3. Valores de capacitancia para las frecuencias de 50 y 60 Hz.

Frecuencia de la fuente (Hz)	Capacitancia (μF)
50	5,3
60	4,4

Ajuste los interruptores de la *Carga resistiva* y de la *Carga capacitiva* (o de las *Cargas inductivas y capacitivas*) para obtener los valores de resistencia y capacitancia requeridos.

20. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, active la fuente de alimentación ca. Si es necesario, en esa misma ventana reajuste el valor del parámetro *Tensión en vacío* para que la tensión de la fuente de alimentación ca E_F , (indicada por el medidor $E1$ en la ventana *Aparatos de medición*) sea de 100 V.
21. Mida el periodo T de la tensión de la fuente utilizando el *Osciloscopio* y luego registre el valor a continuación.

Periodo $T = 16.4$ ms

22. Mida el periodo T de la tensión del resistor E_R utilizando el **Osciloscopio** y luego Registre el valor a continuación.

Periodo $T =$ 16.4 ms

23. Compare el periodo T de la tensión del resistor E_R medido en el paso anterior con el periodo T de la tensión de la fuente E_F registrado en el paso 20. ¿Son similares los valores?

☒ Sí ☐ No

24. Mida el intervalo de tiempo d entre las formas de onda de la tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R .

Intervalo de tiempo $d =$ 2.98 ms

25. Utilice la ecuación (1-11) para calcular el desfase entre la tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R . Considere la forma de onda de tensión de la fuente como referencia.

Desfase = -65.41 °

26. ¿Está la tensión del resistor E_R en adelante o en retraso respecto a la tensión de la fuente E_F ?

Atraso

27. En el **Analizador de fasores**, mida los ángulos de fase θ_{EF} y θ_{ER} de los fasores de tensión.

Angulo de fase $\theta_{EF} =$ 0 °

Angulo de fase $\theta_{ER} =$ 63.55 °

A partir de estos valores, calcule el desfase entre los fasores de tensión de la fuente E_F y la tensión del resistor E_R . Utilice el fasor de la tensión de la fuente como referencia.

Desfase = -63.55 °

28. Compare el valor de desfase que determinó mediante las ondas de tensión sinusoidales con el medido a partir de los fasores de tensión correspondientes. ¿Son similares los valores?

☒ Sí ☐ No

29. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, desactive la fuente de alimentación ca.
30. Cierre el programa **LVDAC-EMS** y apague todo el equipo. Desconecte todos los cables y vuelva a guardarlos en su lugar de almacenaje.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, observó cómo el ángulo de fase modifica el valor de una onda sinusoidal en el instante $t = 0$ y, en consecuencia, la posición en el tiempo de la onda. Observó el efecto de los ángulos de fase positivos y negativos sobre la posición relativa en el tiempo de una onda sinusoidal. Conoció el concepto del desfase. Aprendió cómo calcular y medir el desfase entre dos ondas sinusoidales y cómo diferenciar entre un desfase en adelanto y uno en retraso.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Cuál es el efecto del ángulo de fase sobre la representación gráfica de una onda sinusoidal?

Cambia los valores de la función en el tiempo, gráficamente se ve como se desplaza la onda en el eje de las abscisas, (para la izquierda o derecha)

2. Una onda sinusoidal tiene un ángulo de fase θ de 72° . ¿Esta onda sinusoidal alcanzará su máximo valor antes, después o al mismo tiempo que una segunda onda cuyo ángulo de fase θ es de -18° ?

El valor máximo primero la que tiene fase de 72°

3. Dadas las siguientes dos ecuaciones de ondas sinusoidales:

$$E(t) = 8 \sin 20t + 78^\circ$$

$$E(t) = 40 \sin 20t + 43^\circ$$

Calcule el desfase entre estas ondas, considerando a la primera onda sinusoidal como la referencia. Indique también si la segunda onda sinusoidal está en adelanto o en retraso respecto a la de referencia.

El desfase = Fase - Fase ref = $43 - 78$

= -35

4. Al calcular el desfase entre dos ondas sinusoidales, ¿cuál de los siguientes parámetros debe ser común a ambas ondas: ángulo de fase, amplitud, frecuencia o periodo? ¿Por qué?

Deben tener igual frecuencia, porque si la frecuencia es distinta cambia su periodo, si este es distinto las ondas cambian su comportamiento totalmente.

5. Considere dos ondas sinusoidales de la misma frecuencia. Ambas tienen un periodo T de 50 ms. La segunda onda sinusoidal alcanza su máximo valor positivo 8 ms después que la primera. Calcule el desfase entre las dos ondas sinusoidales considerando a la primera como la referencia.

El desfase se calcula como $(d/T) \cdot 360 = (8 \text{ ms} / 50 \text{ ms}) \cdot 360 = 57,6$

El desfase entre ondas es de -57.6
