

Práctica 3. SIMULACIÓN

Electrónica de Potencia. 2004

Inversor de 50Hz controlado por ancho de pulso con modulación senoidal SPWM

1. Diagrama de Bloques

El inversor que va a montar tiene el siguiente diagrama de bloques:
ver apuntes de clase. Todos los circuitos se deben simular en el mismo fichero.

2. Oscilador e Inversor

El oscilador es un amplificador realimentado positivamente para provocar la inestabilidad y, por lo tanto, la oscilación.

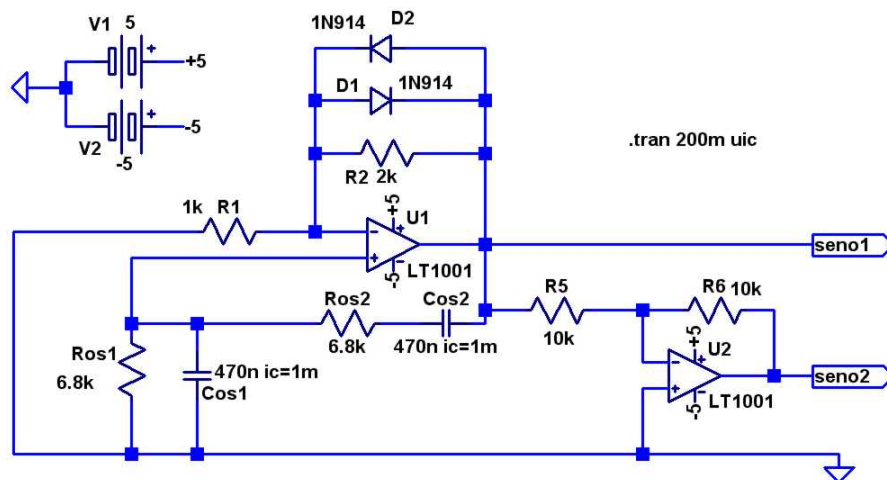


Figura 1: Circuito oscilador senoidal. *seno1* es una senoidal de 50Hz aproximadamente; *seno2* es la misma señal desfasada 180°.

La condición para que oscile es que:

$$R_2 \geq 2R_1$$

Si $R_2 < 2R_1$ no oscila. Si $R_2 = 2R_1$ exactamente, oscila senoidalmente. Cuanto mayor sea R_2 que $2R_1$ más se deforma la forma de la señal, puesto que la inestabilidad se incrementa, la amplitud de la oscilación crece y el operacional se satura. Lo ideal sería obtener la condición $R_2 = 2R_1$, pero debido a la tolerancia

de las resistencias esta condición es prácticamente imposible de obtener. En la práctica se pone $R_2 > 2R_1$ asegurándose que se verifica esa condición a pesar de la tolerancia de las resistencias, y luego se añade en la realimentación negativa un limitador de voltaje para que el operacional no se sature. El limitador de voltaje se consigue simplemente con dos diodos en antiparalelo, de manera que la tensión de salida durante los semiciclos positivos queda limitada por la tensión de ON del diodo en directa, y durante los semiciclos negativos la tensión de salida queda limitada a la tensión de ON del diodo en inversa. De esta manera se asegura la oscilación de salida y se limita su amplitud a $\pm 0,7V$ aproximadamente.

La frecuencia de la oscilación se determina con la realimentación positiva, y su valor es:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}$$

Puesto que deseamos un oscilador a $50Hz$, escribimos la ecuación anterior para despejar el valor de R :

$$R = \frac{1}{2\pi 50C} = \frac{78,54}{C}$$

Ahora hay que encontrar la combinación de R y C que nos de el valor deseado. Lo más fácil es fijar el valor del condensador a uno que tengamos y luego determinar la resistencia, ya que es más fácil obtener valores de resistores. Por ejemplo, fijamos el condensador a $C = 470nF$; la resistencia será $R = 6772,5\Omega$, que se puede conseguir con una $R = 6,8K\Omega$. Con estos valores se consigue una $f = 49,8Hz$.

Simule el circuito de la Figura 1. Añada al valor de los condensadores una condición inicial para que provoque una inestabilidad inicial y que la simulación tarde menos. Esto se consigue escribiendo, en la ventana donde se pone el valor del condensador, la siguiente línea:

$$\boxed{470n \quad ic = 1m}$$

donde $ic = 1m$ quiere decir “*initial condition = 1mV*”. En la ventana para indicar la simulación añade las condiciones iniciales marcando la casilla **Skip Initial operating point solution**, tal y como se indica en la Figura 2

Para obtener la señal senoidal desfasada 180° , se utiliza un operacional en configuración inversora y con ganancia unidad. En este caso se utilizan dos resistencias de $10k\Omega$ para conseguir la ganancia unitaria, tal y como se aprecia en la Figura 1.

En cuanto a los diodos, vale cualquier diodo de propósito general, ya que no hay restricciones severas en voltaje, corriente o frecuencia.

La alimentación de los operacionales se utiliza entre $\pm 5V$ para obtener señales pequeñas a la salida. Posteriormente se utilizarán optoacopladores que precisan tensiones del orden de $5V$, de esta manera nos evitamos posteriores ajustes en los valores de la tensión. La mayoría de operacionales admiten alimentaciones variables, aunque en cada caso se debe verificar en las hojas de características los valores permitidos. Para la simulación elija el operacional

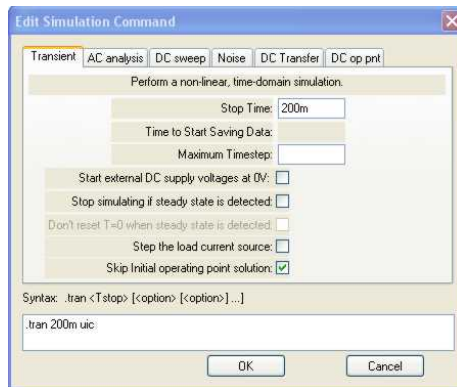


Figura 2: Añadir condiciones iniciales al análisis transitorio.

LT1001, aunque en la práctica se usará otro. Para el oscilador vale cualquier operacional de propósito general, aunque es preferible utilizar alguno de bajo ruido y baja distorsión.

En la Figura 3 se aprecia la salida del oscilador y del inversor. Como se puede apreciar, con $R_2 = 2,2R_1$ la salida es una senoidal bastante pura.

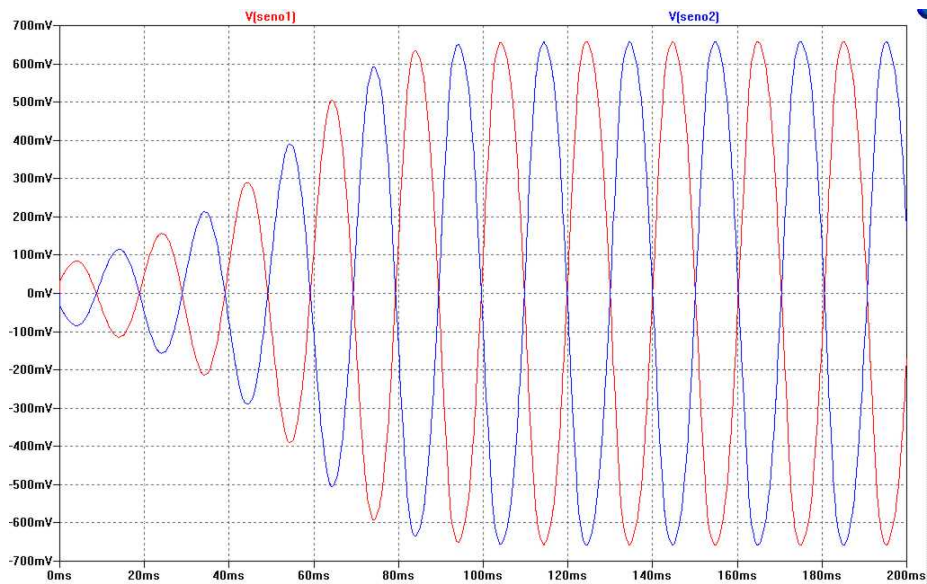


Figura 3: Salida del oscilador y del inversor.

2.1. Opcional

En la simulación se ha puesto $R_2 = 2,2R_1$.

- Incremente aún más el valor de R_2 , por ejemplo $R_2 = 3,3k$. Simule y compruebe que la distorsión es mayor.

- Compruebe las componentes de Fourier que tiene la señal generada. Para ello vuelva a poner $R_2 = 2,2k\Omega$, incremente el tiempo de simulación a un segundo. Simule y represente la función *seno1*. Con el botón derecho pinche sobre la gráfica y elija FFT, que es la opción que figura más abajo en el cuadro de diálogos que se abre. Pulse OK y aparecerá una ventana con las componentes espectrales. Edite el eje vertical y ponga la escala lineal. Ajuste la escala para ver mejor la señal. Si todo ha ido bien debería ver una gráfica como la que aparece en la Figura 4.

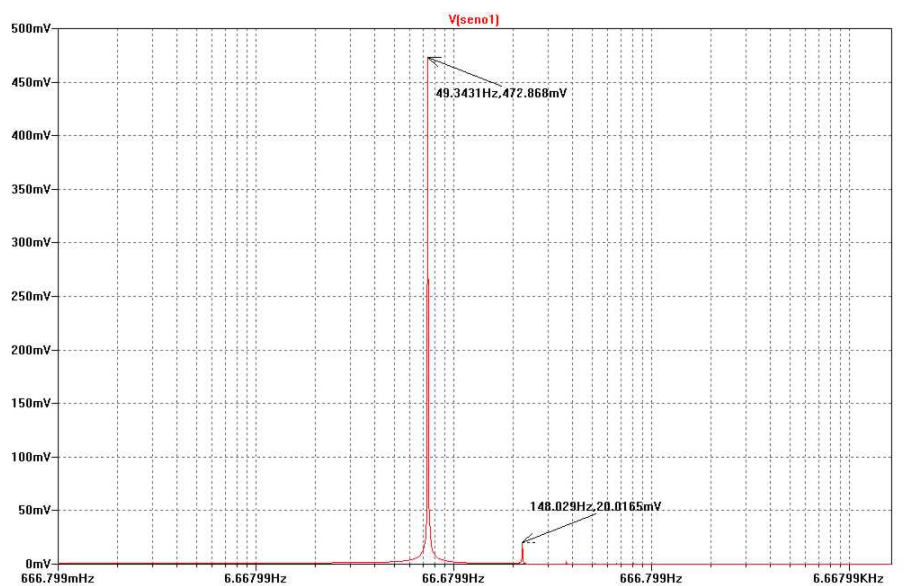


Figura 4: Componentes de Fourier: Armónico fundamental y tercer armónico muy atenuado. La señal es una senoidal casi pura, con una pequeña distorsión en el tercer armónico.

3. Comparador

El comparador se implementa con dos operacionales según se indica en la Figura 6. La onda triangular alterna de $1kHz$ y aproximadamente $0,8V$ de amplitud la simulamos mediante una fuente pulsada. Para ello añade en el esquema la fuente *V3*. Edítela pinchando sobre ella con el botón derecho. Pinche en *Advanced* y elija el tipo de fuente *PULSE*. Rellene las opciones de la fuente como se indica en la Figura 5, no olvide poner las llaves `{}` tal y como se indica. Añada en el esquema la directiva SPICE `.param freq=1k`, que será la frecuencia de la señal triangular. Para reducir el tiempo de simulación haga los siguientes cambios:

- Pinche con el botón derecho en los condensadores del oscilador y modifique el voltaje inicial

`470n ic=300m`

- Modifique el tiempo de simulación, para eliminar las oscilaciones iniciales, de la siguiente manera en el menú *Simulate* \leftrightarrow *Edit Simulation Cnd* \leftrightarrow *transient*:

```
Stop Time 80m
Time to Start Saving Data 20m
```

Ahora puede simular. La señal $S1$ es una señal cuadrada de la misma frecuencia que la triangular, pero el ancho de los pulsos está modulado por la forma de la señal $seno1$. La salida $S2$ también es una onda cuadrada de la misma frecuencia que la triangular, pero con la anchura de los pulsos modulada por la señal $seno2$. Puede graficar ambas señales y comparar su forma con la de los senos.

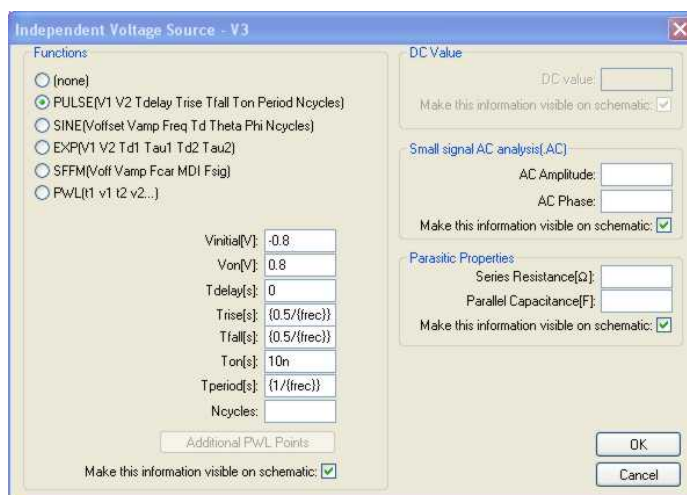


Figura 5: Parámetros para obtener una señal triangular mediante una fuente pulsada.

En la Figura 8 se representan las ondas $S1$ y $S2$ sobrepuestas con las señales $seno1$ y $seno2$ respectivamente. Los senos se han multiplicado por el factor 5,5 para poder igualar las escalas.

4. Restador

El paso siguiente es obtener la señal PWM que será la que gobierne el cierre y la apertura de los interruptores de potencia. Esta señal se consigue restando $S2 - S1$. El restador se implementa con un operacional tal y como se indica en la Figura 7. Es importante que todas las resistencias del restador sean iguales para que no amplifique ninguna señal. A la salida del restador se obtiene la señal $PWM = S2 - S1$.

La onda PWM tiene el doble de frecuencia que la señal triangular y además es una señal cuadrada alterna con la frecuencia de la señal $seno1$. La anchura

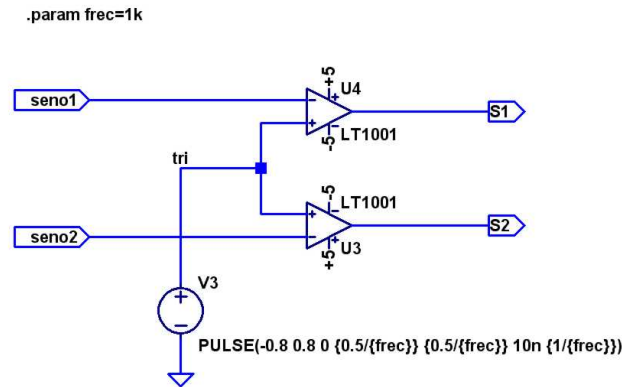


Figura 6: Comparador. Si $seno1 > tri \Rightarrow S1 = -5$; si $seno1 < tri \Rightarrow S1 = 5$; lo mismo para $seno2$

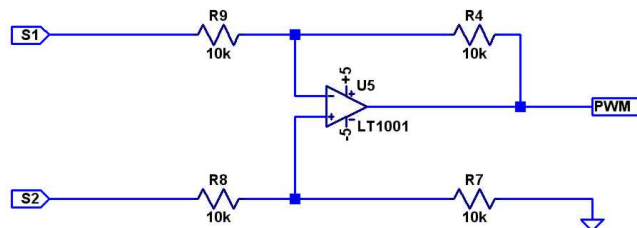


Figura 7: Restador: $S_2 - S_1 = PWM$

de los pulso está modulada con el seno y además incorpora la alternancia de signo. Cuando la amplitud del seno se hace máxima, el ancho de los pulsos se hace máximo. Cuando la amplitud del seno está cerca de cero, la anchura de los pulsos es mínima. En la Figura 8 se puede apreciar la forma que tiene PWM comparada con $seno1$.

Para poder apreciar el correcto funcionamiento de la señal PWM , es decir, comprobar que contiene toda la información de la señal $seno1$, visualizaremos las componentes de Fourier. Para ello siga los siguientes pasos:

- Incremente el tiempo de simulación, ya que cuantos más puntos se tengan en la gráfica mejor se verá luego la transformada de Fourier. El valor que ponga en el tiempo de simulación dependerá de la velocidad de procesamiento de su ordenador. En este ejemplo se ha incrementado el tiempo de simulación a $600ms$. Simule y grafique la señal PWM .
- Pinche con el botón derecho sobre la gráfica y elija FFT. Manteniendo apretada la tecla **Ctrl**, seleccione las señales para las que desee ver las componentes de Fourier: $seno1$, $S1$ y PWM . Incremente el número de puntos a 32768, tal y como se indica en la Figura 9. Pulse **OK**

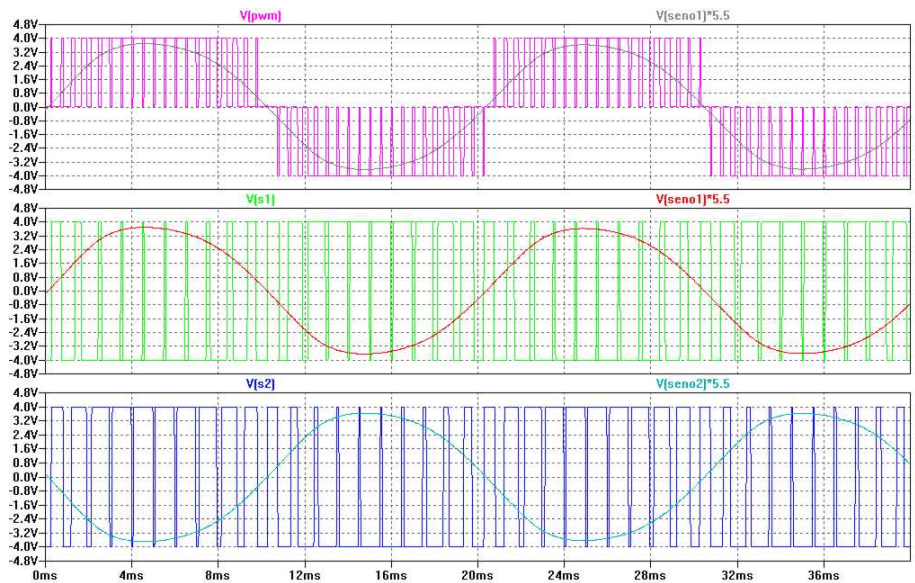


Figura 8: Señales $S1$, $S2$ y PWM

- Añada dos ventanas gráficas en el menú *Plot Settings* \leftrightarrow *Add Plot Pane* y traslade, pinchando con el botón izquierdo del ratón sobre el nombre de la función y arrastrándolo hasta la nueva gráfica, cada función a una gráfica.
- Para cada una de las funciones: edite el eje vertical y seleccione escala lineal. Ajuste el valor de la escala para ver bien la señal.
- Edite el eje horizontal y en la ventana `left` ponga el valor inicial $5Hz$.

Si todo ha ido bien debería ver algo parecido a la Figura 10. En los párrafos siguientes se da una pequeña explicación de los resultados obtenidos.

La señal $seno1$ tiene el armónico fundamental en $50Hz$ y presenta una pequeña distorsión del tercer armónico.

La señal $S1$ contiene los mismos armónicos que la señal $seno1$ y en la misma proporción, aunque están amplificados. Además contiene un armónico en $1kHz$ que se corresponde con la frecuencia de la portadora triangular. A ambos lados de este armónico se pueden apreciar las componentes de $seno1$ que modulan a la portadora. Esta misma figura se repite en $2kHz$ más atenuada, y luego, más atenuada aún, en $3kHz$. Si se añadiese un filtro paso bajo con frecuencia de corte en $500Hz$, por ejemplo, se recuperaría la señal $seno1$.

La onda PWM presenta el mismo patrón que la $S1$, pero como se puede apreciar en la Figura 10, la portadora ha duplicado su frecuencia, y aparece ahora en $2kHz$ y luego repetida en $4kHz$ más atenuada. La mejora introducida por la señal PWM consiste en incrementar la frecuencia de la portadora al doble, por lo que con un filtro paso bajo con frecuencia de corte en $1kHz$ sería suficiente.

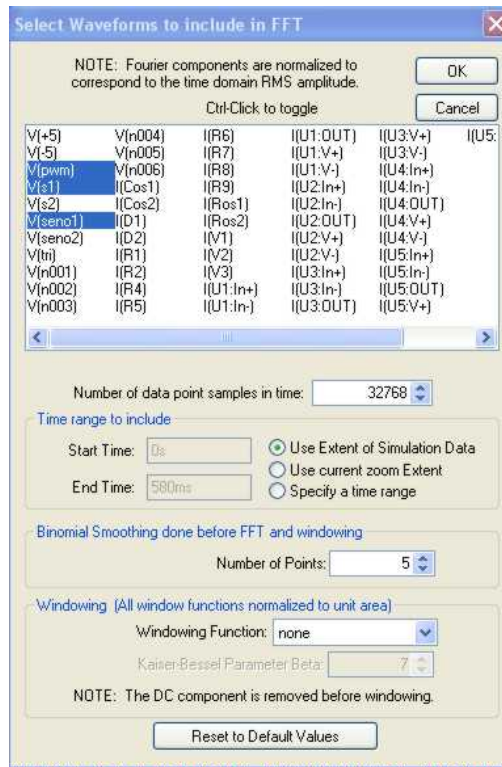


Figura 9: Opciones para ver las componentes de Fourier.

La otra ventaja que aporta *PWM* es la alternancia de signo, lo que facilita el control de los interruptores en la etapa de potencia, tal y como se verá en el siguiente apartado.

5. Acoplamiento y etapa de potencia

El siguiente paso es implementar el aislamiento galvánico para acoplar la señal de control *PWM* con el circuito de potencia formado por los interruptores BJT y las fuentes de potencia V_{cc} y V_{ee} . Usaremos dos optoacopladores con salida BJT. Con ellos implementaremos un amplificador en clase D tal y como se muestra en la Figura 11. Estos dispositivos tienen la posibilidad de utilizarse como transistores BJT utilizando el pin correspondiente a la base. Sin embargo, cuando se utilizan como optoacopladores, dicho pin debe dejarse al aire (sin conectar), ya que la corriente de base la suministra el fotodiodo interno.

Para simular el efecto de tierras independientes, se añade una fuente de tensión entre la tierra del circuito de control, que es la tierra que utiliza la simulación, y el nodo que llamaremos *PWGND*. Esta tensión permite simular el aislamiento galvánico proporcionado por los optoacopladores, y puede darle el valor que desee. Cuando represente señales del circuito de potencia, deberán estar referidas a *PWGND*, y no a la tierra del circuito de control.

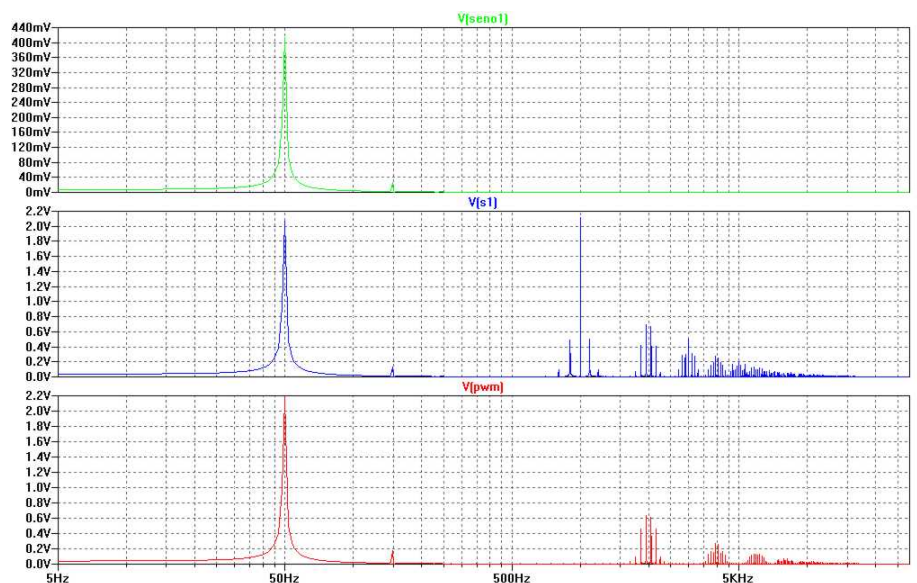


Figura 10: Componentes de Fourier.

Debido a que los BJT incluidos en los optoacopladores no permiten demasiada potencia de salida, en esta simulación las tensiones V_{cc} y menos V_{ee} no pueden ser superiores a $20V$, y la resistencia de carga no puede ser inferior a $2,2K\Omega$, ya que un valor menor solicitaría demasiada corriente de los BJT y estos podrían quemarse.

Para la simulación puede utilizar cualquiera de los modelos de optoacoplador que encontrará en el apartado [Optos] de la ventana para seleccionar componentes. Añada las etiquetas *out* y *PWGND* a los nodos indicados en la Figura 11. Fije el tiempo de simulación desde $20ms$ a $60ms$, simule y represente la función $V(out)$ y $V(seno1)$. Pinche con el botón derecho sobre el nombre de la función $V(out)$ y añada lo siguiente para referenciar la salida al cero de potencia:

$$V(out, PWGND)$$

Edite la función *seno1* y añada:

$$V(seno1) * 20$$

Ahora debería ver algo como lo que aparece en la Figura 12. La salida del circuito de potencia coincide con la señal *PWM* pero amplificada hasta alcanzar los valores de V_{cc} y V_{ee} . Por lo tanto, contiene la misma información y las mismas componentes de Fourier. Si añadimos un filtro paso bajo con frecuencia de corte $1kHz$ aproximadamente, obtendremos una señal senoidal de $50Hz$ y de amplitud V_{cc} , a partir de señales de continua, que es el resultado esperado de un inversor, o convertidor $DC \rightarrow AC$.

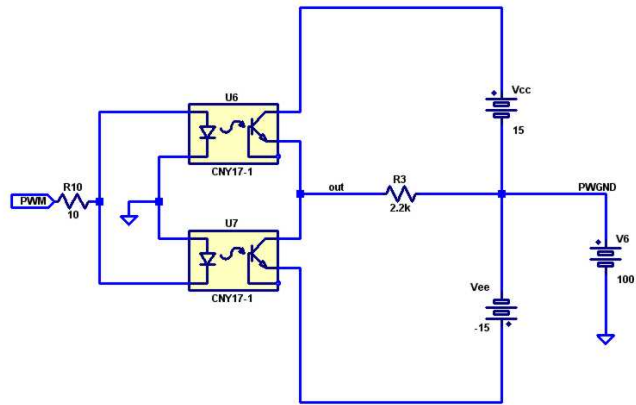


Figura 11: Acoplamiento de la señal de control con aislamiento galvánico y amplificación.

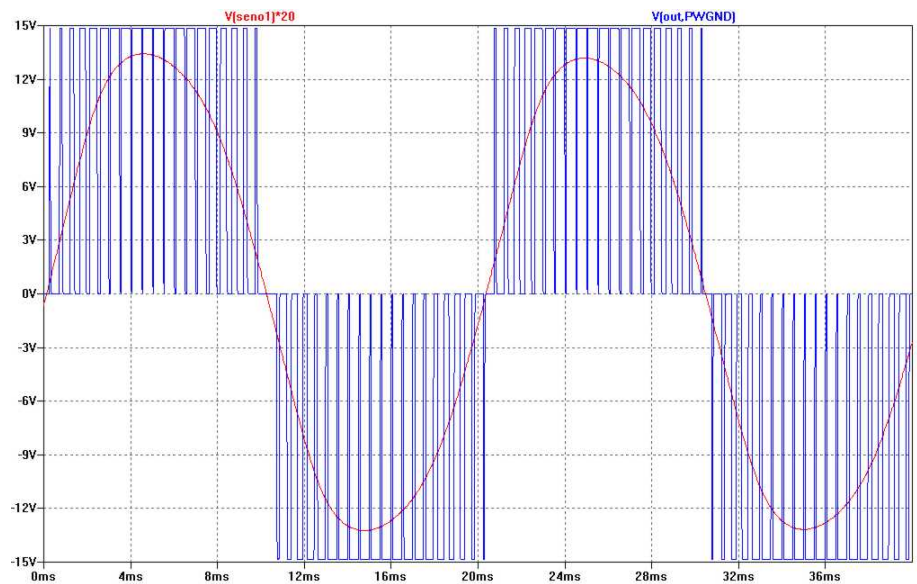


Figura 12: Salida del circuito de potencia.