

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

### 3. Medidas.

Las medidas que se van a realizar en el sistema las podemos observar en la Figura 19, en la cual podemos ver que dos son medidas de corriente y tres corresponden a medidas de tensión. La medida de corriente a la salida no se considera necesaria porque podemos conocer la potencia que estamos inyectando desde el rectificador, de forma que conociendo la tensión de salida, podemos saber cual es la corriente de salida, salvo por las pérdidas que se producirán en los semiconductores del inversor. La nomenclatura que se muestra en la figura es la que se sigue en el esquemático del sistema para la realización de la placa. Para los puntos que tienen más de una etiqueta, la que se ha usado para el esquemático ha sido la que está recuadrada.

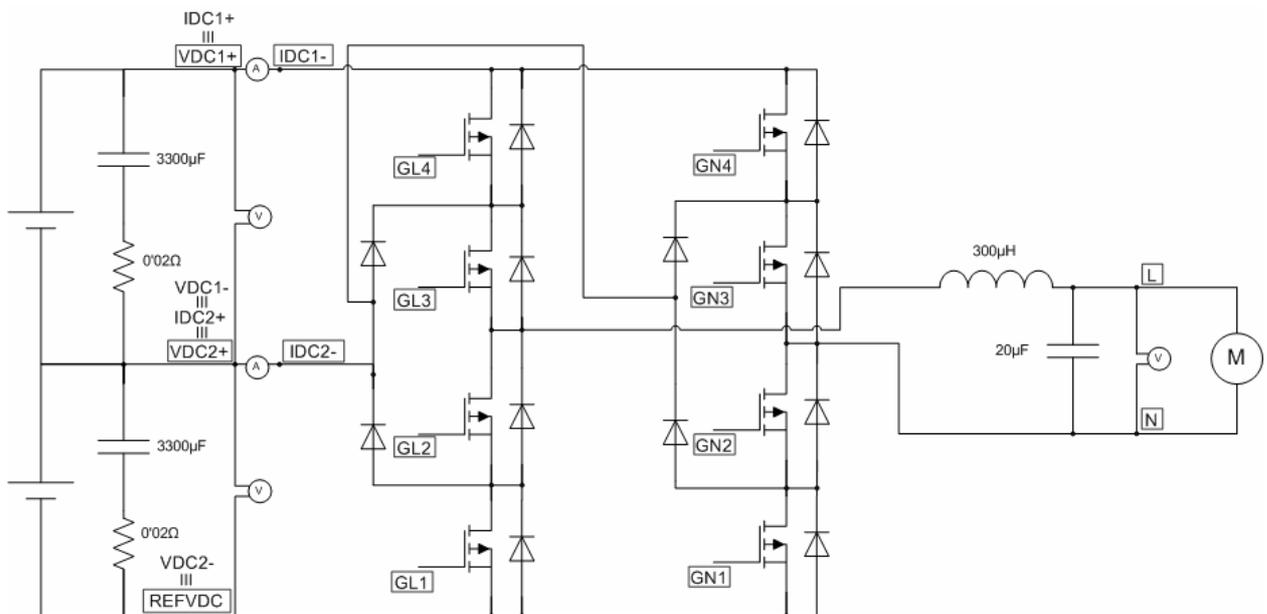


Figura 19. Medidas en el esquema del sistema.

#### 3.1. Medidas de tensión.

Se realizan tres medidas de tensión en el sistema, las cuales son las dos tensiones de condensadores en el lado de tensión continua y la tensión de salida del sistema.

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

Para realizar estas medidas se utilizan sensores de efecto Hall (LV 25-P). Estos sensores necesitan adaptación tanto a la entrada como a la salida, ya que la medida de tensión lo hacen a través de conocer la corriente que pasa por el sensor.

### 3.1.1. Tensión de condensadores.

En las tensiones de condensadores el máximo que vamos a tener lo hemos situado en 165V, ya que al ser obtenidos por rectificación de la tensión de 220VAC, los picos máximos son de 311V, por lo que la rectificadora siempre estará por debajo de ese límite. Aún así, la adaptación de la señal de entrada al sensor se va a realizar ajustando al límite que puede medir dicho sensor, el cual está en 500V, para así poder tener una adaptación versátil a futuros cambios en el sistema. Para ello tendremos que colocar una resistencia en serie con la medida de manera que por el sensor pase una corriente de 10mA cuando estemos en el límite de tensión. La resistencia habrá que colocarla según el esquema de la Figura 20.

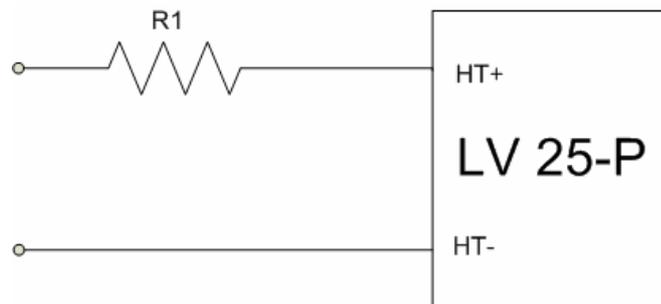


Figura 20. Adaptación del primario del sensor LV 25-P.

Si el máximo de la medida son 500V, tendremos que la resistencia a colocar debe cumplir:

$$10mA \cdot R1 = 500V \Rightarrow R1 = 50k\Omega$$

Puesto que 50kΩ no es un valor comercial, pasaremos a 47kΩ, que es el valor comercial más cercano por debajo de 50kΩ, de forma que no deberemos pasar de 470V en nuestra medida para no sobrecargar el sensor. Con lo que las especificaciones de la resistencia debe cumplir que tenga un valor de 47kΩ y poder disipar una potencia de:

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{470^2}{47000} = 4.7W$$

En el secundario del sensor también se necesita adaptación de la señal. El sensor nos dará una corriente de 25mA para el caso de medida de la tensión máxima, y como la entrada del Convertidor Analógico-Digital (ADC) tiene un rango de tensión de 0 a 3V, habrá que situar una resistencia  $R_M$ , la cual transformará la corriente de salida del sensor en tensión, ya que el ADC funciona por nivel tensión. El sensor de tensión quedará como se muestra en la Figura 21.

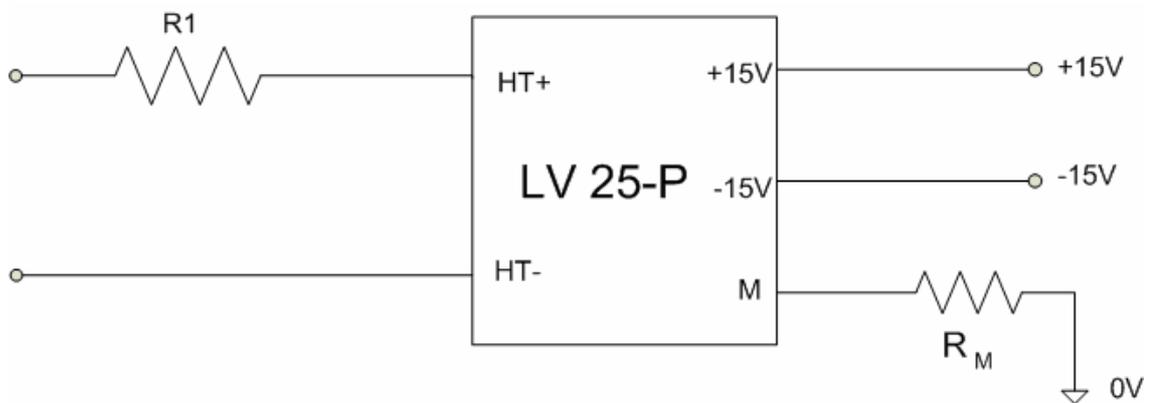


Figura 21. Conexión del sensor LV 25-P.

Con los 25mA de corriente, tenemos que pasar al rango de 3V, pero como vamos a poder medir tensión positiva y negativa, ajustaremos a 1.5V de voltaje máximo, de manera que habrá que tener una resistencia  $R_M = \frac{1.5V}{0.025A} = 60\Omega$ .

Según la documentación del fabricante del sensor, el valor de la resistencia  $R_M$  debe estar entre 100 $\Omega$  y 350 $\Omega$ , así el valor de 60 $\Omega$  queda fuera del rango. La resistencia deberá ser mayor de 100 $\Omega$ , lo cual nos lleva a tensiones mayores de las que admite el ADC, de manera que habrá que colocar un amplificador con montaje inversor para poder tener una ganancia menor que la unidad. Aprovechando este montaje sumaremos un voltaje de offset que hará pasar el rango de 3V desde [-1.5V, +1.5V] hasta el intervalo [0V, 3V], que es el intervalo necesario a la entrada del ADC.

Debido al número de variables que tendremos ahora con el montaje inversor y la señal de offset, analizaremos primero el sistema para determinar los valores de

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

todas las resistencias y de la referencia de tensión. Esta última será fija en el sentido en que habrá que ajustarse a las referencias de tensión comerciales, de forma que será de las variables del sistema con más restricciones. El montaje que tendremos es el que se muestra en la Figura 22, en el que se ha sustituido el sensor de tensión por una fuente de corriente, ya que es la forma en la que trabaja dicho sensor. La fuente de tensión que se ha situado en el esquema es para poder realizar el análisis en frecuencias de la salida respecto a la variación de tensión en la entrada.

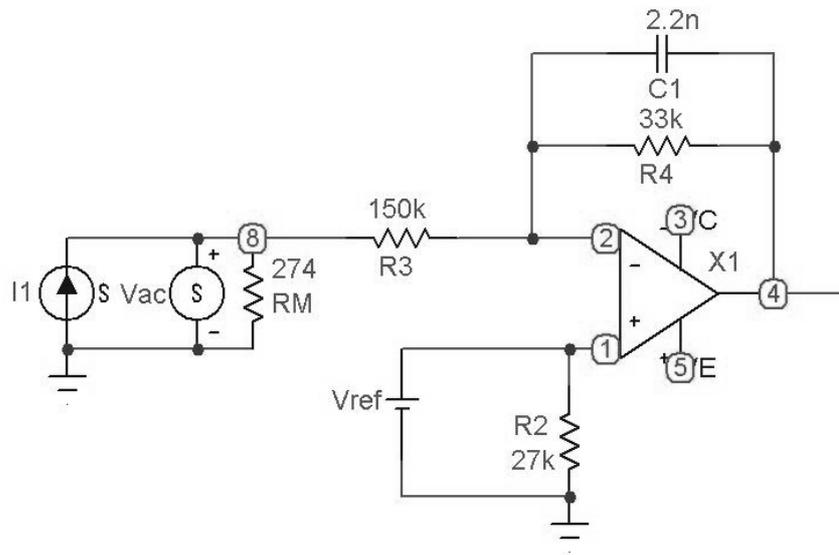


Figura 22. Adaptación del secundario del sensor LV 25-P.

La ganancia del amplificador la obtenemos por el principio de superposición:

$$V_i = 0 \Rightarrow V_o = \frac{V_{ref}}{R3} \cdot (R3 + R4)$$

$$V_{ref} = 0 \Rightarrow V_o = \frac{-V_i}{R3} \cdot R4$$

Con lo que la tensión de salida será la suma de las dos obtenidas:

$$V_o = \frac{V_{ref}}{R3} \cdot (R3 + R4) - V_i \cdot \frac{R4}{R3} = \frac{1}{R3} [V_{ref} \cdot (R3 + R4) - V_i \cdot R4]$$

De esta forma tenemos que conseguir que para los valores extremos a la entrada tengamos los valores admisibles por el ADC a la salida de la adaptación.

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

La tensión de entrada a la adaptación depende de la resistencia  $R_M$ , y sabemos que, al tener un montaje inversor, cuando tengamos la corriente de salida máxima, debemos tener 0V a la salida de la adaptación, lo cual usaremos como una de las restricciones para solucionar el sistema.

$$V_i = 0'025 \cdot R_M;$$

Con lo que la tensión de salida nos queda:

$$V_o = 0V = \frac{1}{R3} [V_{ref}(R3 + R4) - 0'025 \cdot R_M \cdot R4]$$

Para reducir el número de variables hacemos lo siguiente:

$$K = \frac{R4}{R3}$$

$$V_o = [V_{ref}(1 + K) - 0'025 \cdot R_M \cdot K]$$

A la salida del montaje la señal de offset debe generar un voltaje de 1'5V, ya que esta tensión es la mitad del rango que hay que subir para estar sólo con valores positivos. Por ello tendremos que, cuando la tensión de entrada es cero, la salida debe ser de 1'5V.

$$V_o = 1'5V = V_{ref} \cdot (1 + K) \Rightarrow V_{ref} = \frac{3}{2 \cdot (1 + K)}$$

Sustituyendo en la anterior ecuación:

$$V_o = \frac{3 \cdot (1 + K)}{2 \cdot (1 + K)} - 0'025 \cdot R_M \cdot K = 0V \Rightarrow \frac{3}{2} = 0'025 \cdot R_M \cdot K$$

$$R_M \cdot K = 60$$

Con estas ecuaciones tendremos que empezar por seleccionar una tensión de referencia, una vez que la tenemos sabemos la ganancia que tenemos que poner en el amplificador inversor, y de ahí obtenemos mediante la última ecuación la  $R_M$  necesaria para la salida del sensor de corriente.

La referencia de tensión se va a realizar con el integrado LM385Z que nos da una referencia de 1'235V, lo cual nos lleva a necesitar una ganancia  $K=0'2146$ . Para tener ese valor de ganancia existen muchas combinaciones de resistencias, si bien

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

vamos a calcular qué orden de magnitud tendrán que tener las resistencias del amplificador inversor para que la corriente que circule por dicho montaje sea inferior al 0'2% de la que circule por la resistencia de medida  $R_M$ , de esta forma lograremos una medida más precisa de la tensión. Para calcular la corriente que circulará por el amplificador inversor y por  $R_M$  se analizará el esquema simplificado de la Figura 23. Como el análisis del circuito es para corriente continua, los condensadores se consideran circuitos abiertos. El amplificador operacional tiene resistencia infinita a la entrada, por lo que tampoco dejará pasar corriente por su interior. Así todo, nos queda que la resistencia equivalente del montaje es la suma de las resistencias  $R_3$  y  $R_4$ . Realizaremos los cálculos suponiendo inicialmente un valor de  $R_M=270\Omega$ .

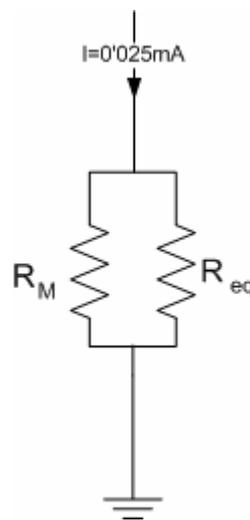


Figura 23. Esquema simplificado de la salida del sensor.

Analizando el circuito tenemos lo siguiente:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{270} + \frac{1}{R_{eq}} = \frac{R_{eq} + 270}{270 \cdot R_{eq}}; \quad V_T = R_{total} \cdot I_T; \quad I_T = I_{R_M} + I_{R_{eq}}$$

Calculando la corriente que va por cada una de las resistencias:

$$I_{R_M} = \frac{V_T}{270} = \frac{270 \cdot R_{eq}}{(270 + R_{eq})} \cdot \frac{I_T}{270}$$

$$I_{R_{eq}} = \frac{V_T}{R_{eq}} = \frac{270 \cdot R_{eq}}{(270 + R_{eq})} \cdot \frac{I_T}{R_{eq}}$$

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

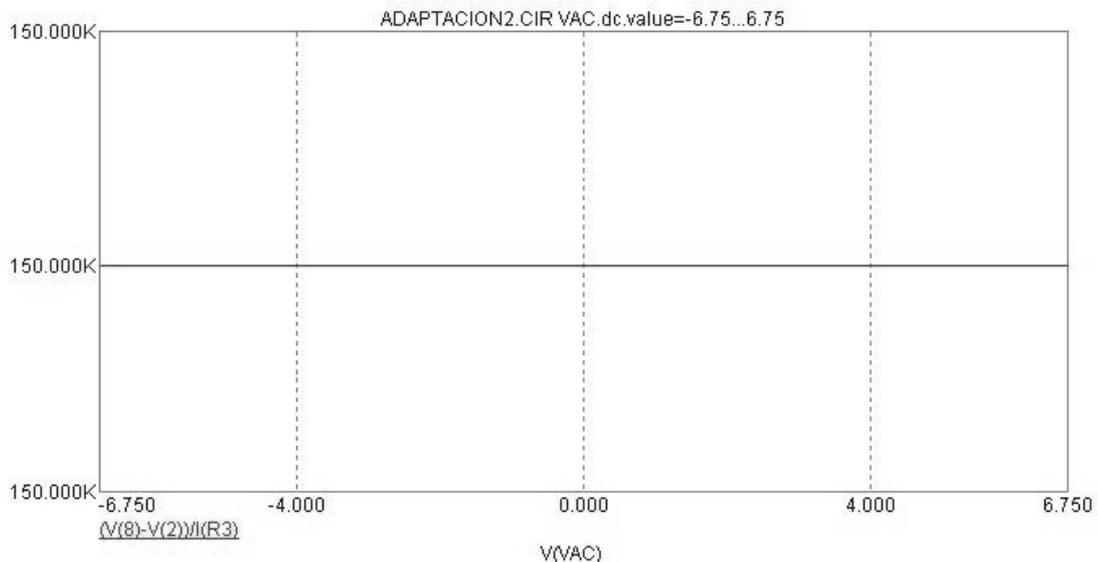
Imponiendo la siguiente condición obtenemos el orden de magnitud de las resistencias:

$$I_{R_{eq}} \leq 0'2\% \cdot I_{R_M}$$

$$\frac{270 \cdot I_T}{270 + R_{eq}} \leq \frac{2 \cdot R_{eq} \cdot I_T}{1000 \cdot (270 + R_{eq})}$$

$$R_{eq} \geq \frac{270000}{2} = 135k\Omega$$

Para lograr nuestro objetivo podemos utilizar de resistencias R3=150kΩ y R4=33kΩ, teniendo de esta forma una resistencia equivalente mayor que el mínimo calculado y además, nos daría un valor de K=0'22, siendo dicho valor una buena aproximación del valor buscado, que era de K=0'2146. En la Figura 24 se muestra la gráfica que representa la resistencia equivalente de R3 en función de la tensión a la entrada, siendo la resistencia representada por la caída de tensión en R3 dividida entre la corriente que pasa por dicha resistencia.



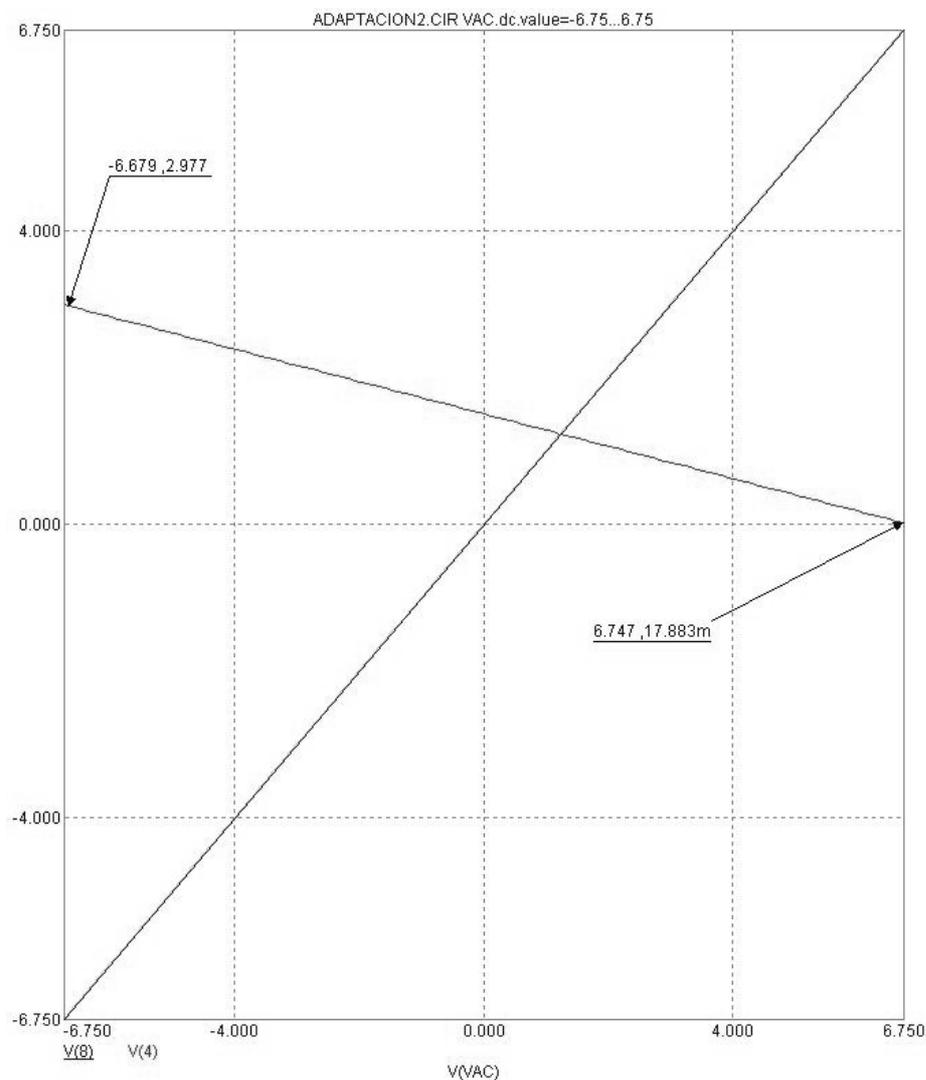
**Figura 24. Resistencia equivalente de R3 desde la entrada.**

Para este valor de K tendremos un valor de  $R_M=272'7\Omega$ , siendo el valor de resistencia comercial usado el de  $274\Omega$ , teniendo una variación del 1% respecto al valor teórico.

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

La respuesta del montaje realizado se simuló mediante MicroCap 7.1.6, para obtener el comportamiento del sistema en un análisis DC en el que se sustituye la fuente de corriente que hace las veces de sensor por una fuente de tensión que abarca los límites a los que llegará el sensor. Se hace variar el valor de la tensión por la fuente desde  $-6.75V$  hasta  $+6.75V$ , de forma que se obtiene la salida para todo el rango de tensiones que se podrán medir con dicho sensor, ya que con la corriente de salida del sensor, esas serán las tensiones producidas en la resistencia  $R_M$ .

En la Figura 25 podemos observar la tensión que tenemos a la salida del sensor con la resistencia de  $274\Omega$  y observamos también la tensión que tenemos a la salida de la adaptación de la medida.

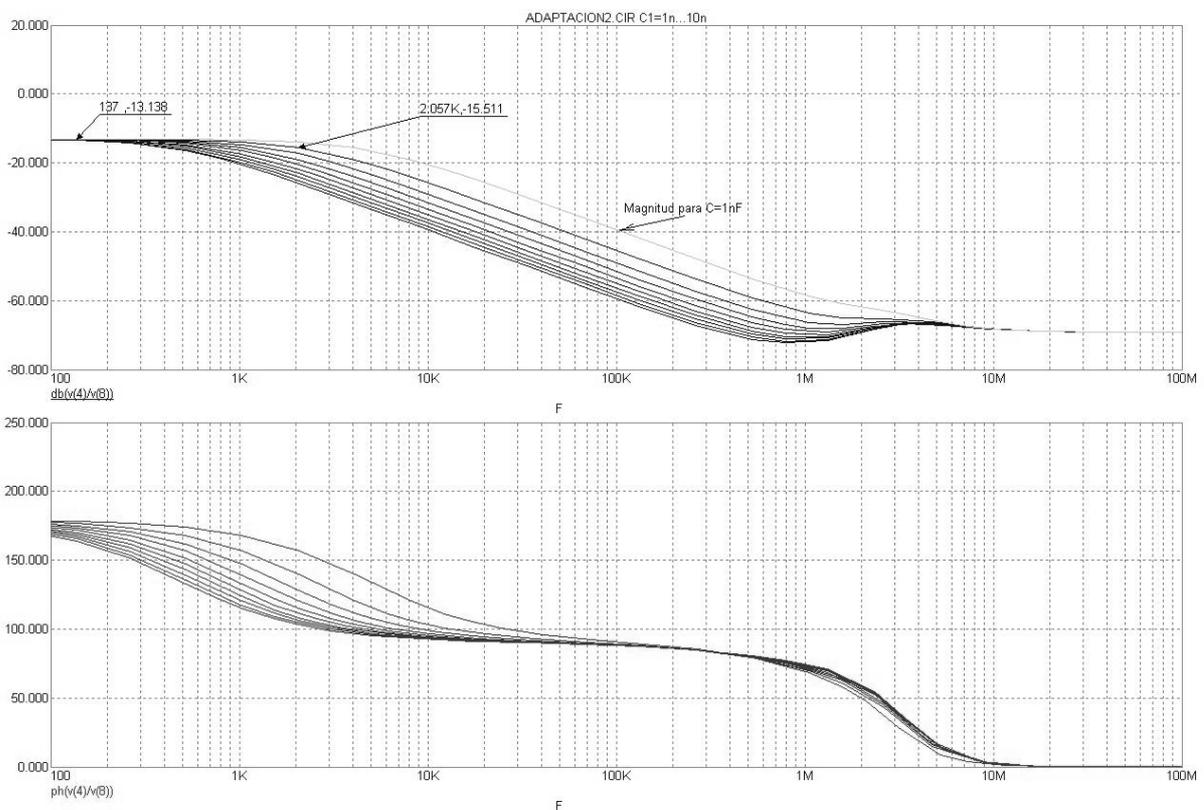


**Figura 25. Entrada (creciente) y salida (decreciente) de la adaptación de la medida de tensión.**

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

- **Filtro antialiasing.**

El condensador que se sitúa en la realimentación del amplificador operacional da como resultado un filtro paso-bajo para así tener un filtro antialiasing con el cual rechazar las altas frecuencias. Dicho filtro se ha intentado dimensionar para una frecuencia de corte de 2500Hz, para lo cual se ha realizado un análisis paramétrico respecto al valor del condensador de forma que entre 1nF y 10nF encontráramos que la frecuencia de corte de 2500Hz pertenecía a ese rango, lo que podemos ver en la Figura 26.



**Figura 26. Análisis paramétrico del filtro respecto al valor del condensador C1.**

La variación en el análisis se ha hecho con incrementos de 1nF, de forma que la línea del condensador de 2nF es la que más se aproxima a la frecuencia de corte de 2500Hz que buscábamos. Puesto que 2nF no es un valor comercial, pasamos a los 2'2nF, quedando el análisis en frecuencias como se muestra en la Figura 27, donde se puede ver que la frecuencia de corte se sitúa en los 2180Hz.

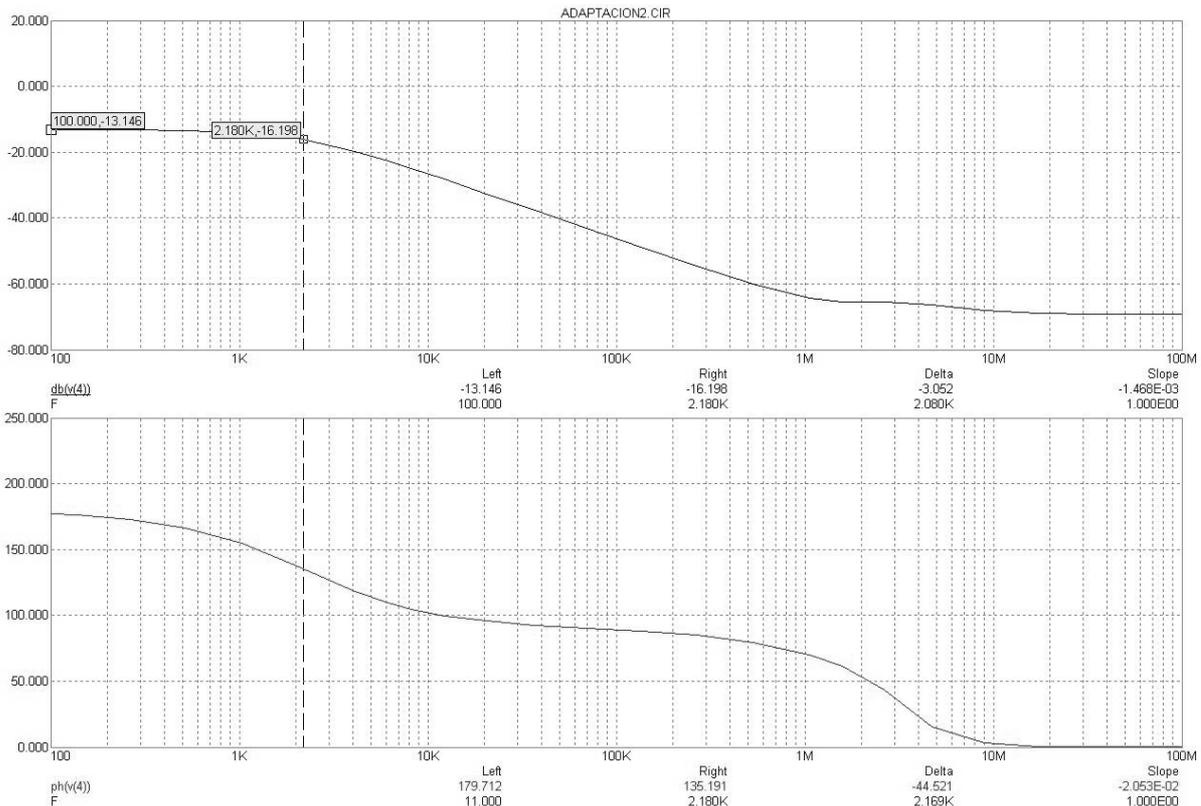


Figura 27. Análisis en frecuencias para  $C1=2 \cdot 2nF$ .

### 3.1.2. Tensión de salida.

La adaptación del voltaje de salida del convertidor es igual que la que se ha realizado para la tensión de condensadores de la entrada, ya que, a pesar de ser una tensión alterna, el sensor de efecto Hall nos da el valor RMS de la tensión, por lo tanto para medir el máximo de tensión posible estaremos en el mismo caso que el anterior. Para la tensión de condensadores, el medir el valor RMS no influye en nada, puesto que estábamos con tensión continua, y por tanto, coincide el valor de tensión con el valor RMS. En este caso, aunque no coincide el valor instantáneo de la tensión con el valor RMS, al darnos el sensor el valor RMS, tendremos que realizar la misma adaptación, quedando la resistencia de entrada de  $47k\Omega$  y  $4.7W$  disipados para medida nominal.

La adaptación del secundario también coincidirá, al tener también la posibilidad de medir tensiones positivas y negativas, situándose también el condensador en la realimentación del amplificador operacional para filtrar la alta frecuencia.

	Proyecto Fin de Carrera	Alumno
	Diseño e implementación de un convertidor monofásico de cinco niveles con control basado en DSP	José Francisco Campos Bizcocho

### 3.2. Medidas de corriente.

Las medidas de corriente se van a realizar también con sensores de efecto Hall, en este caso mediante los LA 25-NP. Las corrientes que vamos a medir son las dos de salida de los condensadores, como ya se indicaba en la Figura 19, donde se puede observar la disposición exacta de las medidas de corriente a realizar.

#### 3.2.1. Corriente de salida de los condensadores.

Al igual que se hizo con los sensores de tensión, vamos a configurar el sensor de corriente para poder medir el máximo rango de corriente que permite el mismo, esto son 25A nominales.

Para la configuración de máxima corriente el sensor tiene una relación de vueltas entre el primario y el secundario de 1:1000, de forma que por el secundario tendremos una corriente máxima nominal de 25mA. Como este valor es el mismo que teníamos para la tensión máxima nominal en los sensores de tensión, tendremos que realizar la misma etapa de adaptación de señal para lograr el rango de 0V a 3V en la entrada del ADC del DSP. De modo que no tendremos que analizar este caso, al estar diseñado para la misma corriente de salida en el apartado anterior.

La configuración especial de los sensores LA 25-NP para el máximo de corriente implica un conexionado entre sus terminales del primario, el cual se muestra en la Figura 28.

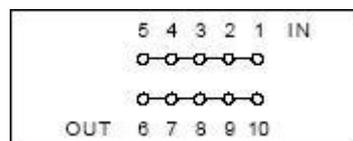


Figura 28. Conexionado de los terminales del LA 25-NP para medir la máxima corriente.