



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA

TÍTULO: CONTROL DE BOMBA DE AGUA DEL LABORATORIO DE
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL

AUTORES: AIRA DOMÍNGUEZ, TIRSO
VÁZQUEZ NÚÑEZ, MARCOS

TUTOR: QUINTIÁN PARDO, HÉCTOR

FECHA: 8 MAYO DE 2020

MATERIA: FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA



ÍNDICE

1. TABLA DE ILUSTRACIONES.....	2
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	3
3. ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SENSOR.....	4
3.1 ACONDICIONAMIENTO DE RANGO DE VALORES.....	4
<i>Simulación circuito amplificador para acondicionamiento del sensor:</i>	<i>5</i>
3.2 FILTRO PASO BAJO ACONDICIONAMIENTO SENSOR.....	5
<i>Simulación filtro paso bajo para acondicionamiento del sensor:</i>	<i>6</i>
4. ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DEL MOTOR.....	7
4.1 FILTRADO DE LA SEÑAL DE LA BOMBA.....	7
<i>Simulación filtro orden dos de la bomba:</i>	<i>8</i>
<i>Simulación del filtro de la señal de la bomba:</i>	<i>9</i>
5. AMPLIFICACIÓN DE CORRIENTE.....	11
<i>Simulaciones:</i>	<i>16</i>
6. DISEÑO DE PLACA PCB	20
6.1 PRIMERA ETAPA.	22
6.2 SEGUNDA ETAPA.....	23
6.3 ETAPA FINAL CON ARDUINO	24
6.4 PCB EN 3D	26
7. BIBLIOGRAFÍA.....	27



1. Tabla de ilustraciones

1 Diagrama de bloques.....	3
2. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor.....	4
3. Simulación circuito de acondicionamiento señal del sensor	5
4. Filtrado de la señal del sensor	6
5. Bode del filtro de la señal del sensor	6
6. Filtro orden dos para la señal de control de la bomba.....	8
9. Bode filtro orden tres para la señal de control de la bomba.....	10
10. Respuesta temporal filtro orden tres para la señal de control de la bomba	10
11. Espectro frecuencial filtro de orden tres para la señal de control de la bomba	11
12. Datasheet amplificador operacional UA741	11
13 Curva corriente velocidad de la bomba	12
14. Curva corriente de colector frente a ganancia transistor 2SC4793.....	13
15. Datasheet transistor 2SCR574D3	13
16. Curva corriente colector frente a ganancia transistor 2SCR574D3	14
17. Curva tensión base emisor frente a corriente de colector transistor 2SCR574D3 .	14
18. Curvas tensión colector emisor frente a corriente de colector	15
19. Circuito de amplificación de corriente.....	16
20. Configuración de la simulación de barrido en voltaje	16
21. Simulación de barrido en voltaje	17
22. Circuito amplificador corriente con fuente de corriente y su configuración de barrido	17
23. Simulación barrido en corriente.....	18
24. Configuraciones simulación barrido en tensión y en corriente.....	18
25. Configuraciones simulación barrido en tensión y en corriente.....	18
26. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión colector emisor.....	19
27. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión base emisor	19
28. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión base emisor con zoom	19
29. Circuito de acondicionamiento de la bomba.....	20
30. Condiciones para el cálculo del ancho mínimo de pista	20
31. Resultado del ancho mínimo de pista	21
32. Conversión de mils a mm para comprobar restricciones	21
33. Conversión de mils a mm para comprobar restricciones 2	21
34. Esquemático primera etapa del circuito en EAGLE.....	22
35. PCB de la primera etapa del circuito en EAGLE	22
36. Esquemático segunda etapa del circuito en EAGLE	23
37. PCB de la segunda etapa del circuito en EAGLE.....	23
38. Esquemático del circuito completo en EAGLE	24
39. PCB circuito completo en EAGLE	24
40. Plano de masa aplicado a la capa 'Top'	25
41. Plano de masa aplicado a la capa 'Bottom'	25
42. PCB 3D sin componentes	26
43. PCB 3D con componentes.....	26



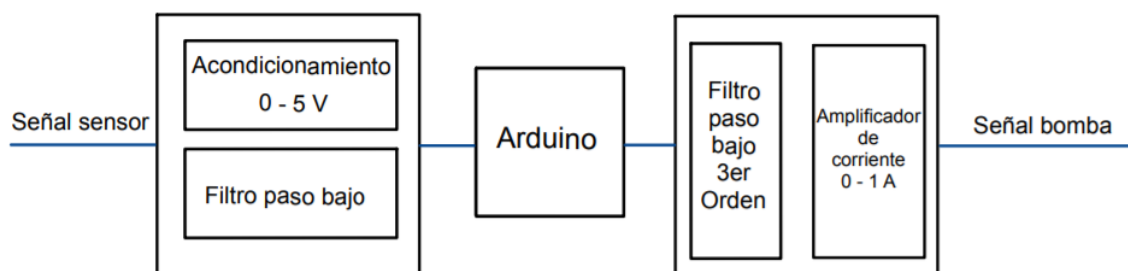
2. Objetivos del trabajo

Lo que se pretende con el presente trabajo es el control de una de las bombas de agua de las plantas del laboratorio de control y optimización de la EUP. Para su consecución, pasaremos por las siguientes etapas:

- Acondicionamiento de la señal del sensor: el sensor de nivel que hay en la planta proporciona una señal que habrá que acondicionar para llevarla al rango de valores deseado.
- Filtrado de la señal del sensor: la señal acondicionada proveniente del sensor deberá ser filtrada para atenuar el posible ruido que tenga y así conseguir una señal lo más limpia posible.
- Filtrado de la señal procedente del Arduino: una vez procesada la señal a través de una placa Arduino, la placa proporcionará una señal de control que habrá que filtrar para conseguir una señal de continua.
- Amplificación de la corriente: la señal que debe recibir la bomba deberá de estar entre valores concretos de corriente. Por lo tanto, necesitaremos amplificarla y acondicionarla de tal manera que cumpla las especificaciones establecidas.

Observaciones:

- Ante la imposibilidad de implementar un circuito físico, se ha decidido usar, en los circuitos simulados, asociaciones de componentes comerciales.
- Se dispondrá de una alimentación bipolar de $\pm 12V$. Fuente con la que alimentaremos todos los amplificadores operacionales y, mediante divisores de tensión, podremos ajustarla a valores si fuera necesario para cumplir los requisitos de nuestro trabajo.
- En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques que representaría el diseño del trabajo, junto a las etapas correspondientes:



1 Diagrama de bloques



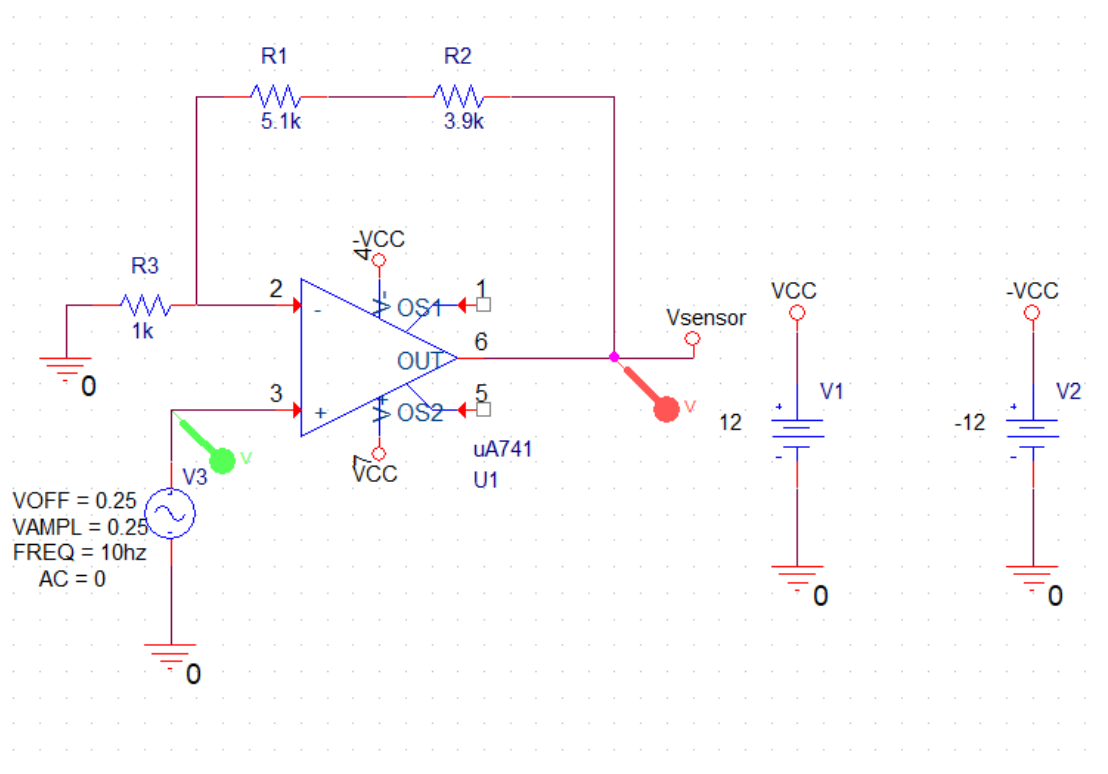
3. Acondicionamiento de la señal del sensor

3.1 Acondicionamiento de rango de valores

El sensor con el que se trabaja en esta etapa tiene una sensibilidad de $\frac{10 \text{ mV}}{\text{cm de agua}}$, tomando como 0% de nivel 5 cm y como 100% de nivel 50 cm. Por lo tanto, la señal de menor valor que podrá proporcionar será de $10 \text{ mV} * 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ V}$; y la señal de mayor valor de $10 \text{ mV} * 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ V}$. Al trabajar con una placa Arduino se deben acondicionar los rangos, por lo que se tiene que aplicar una ganancia para establecer el rango de la señal entre 0 V y 5 V.

$$\text{Ganancia} = \frac{5}{0.5} = 10$$

Por ello, se implementará un circuito con amplificador operacional en modo no inversor y una ganancia de 10 como bien representa la Figura 2:



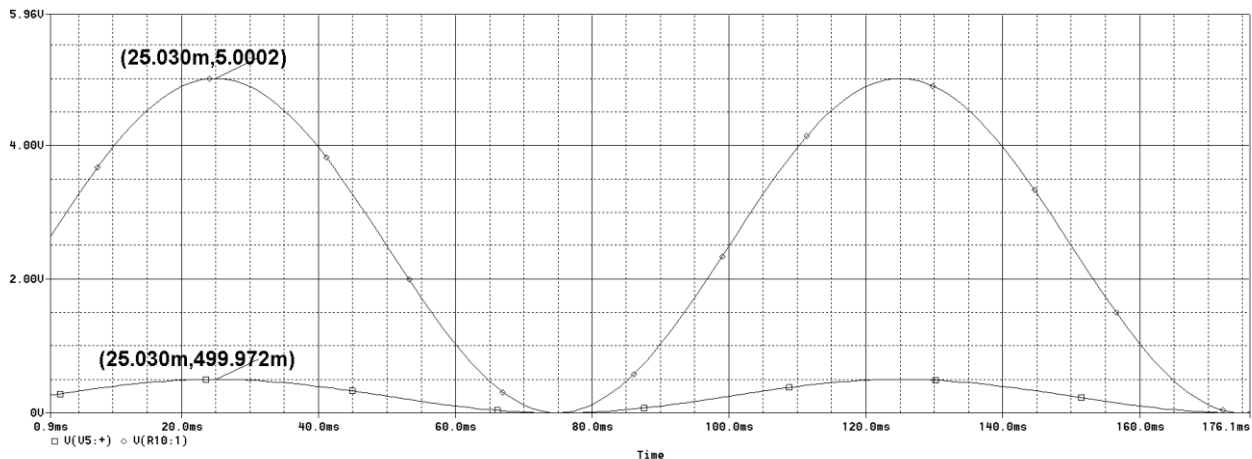
2. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor

En el circuito amplificador aplicamos una tensión alterna, ya que se sabe que del sensor sale una señal continua con variaciones en el tiempo. Aplicamos una tensión de offset para desplazar la señal alterna y que varíe de 0 a 0.5V.

La salida del amplificador operacional se establecerá bajo un rango de 0 a 5V.



Simulación circuito amplificador para acondicionamiento del sensor:



3. Simulación circuito de acondicionamiento señal del sensor

Como se puede observar en la Figura 3, la señal de salida ya está acondicionada entre 0 y 5V. Teniendo en cuenta que el menor voltaje que va a dar el sensor será de 0.05V (0% nivel).

3.2 Filtro paso bajo acondicionamiento sensor

Tal y como se especifica en el trabajo, debemos atenuar las frecuencias altas y mantener, dentro de lo posible sin atenuar, un rango de frecuencias bajas. Para ello, utilizamos un filtro paso bajo. Este filtro nos atenúa las frecuencias altas y nos permite el paso de las frecuencias bajas.

En esta etapa se pretende filtrar la señal proveniente del sensor, pero con el voltaje de salida amplificado. Esta señal vendrá como una señal de continua con variaciones en el tiempo, como máximo de 0.1s. Esto indica que la señal podrá variar entre frecuencias de hasta $1/0.1 = 10$ Hz. Por lo tanto, se han de filtrar todas aquellas señales mayores de 10 Hz, teniendo como requisito que las señales de 1 KHz se atenúen al menos 30 dBs y teniendo en cuenta que la señal del sensor (entre 0 y 10Hz) no se atenúe más de 2dB. Para esas frecuencias de corte y las limitaciones de atenuación, se calcula el intervalo de frecuencias de corte admitidos.

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

$$-30 \text{ db} = 20 * \log \log (x) \Rightarrow x = 0.0316$$

$$0.0316 = \frac{1}{\sqrt{1 + (1000/f_c)^2}} \Rightarrow f_c = 31.62 \text{ Hz}$$



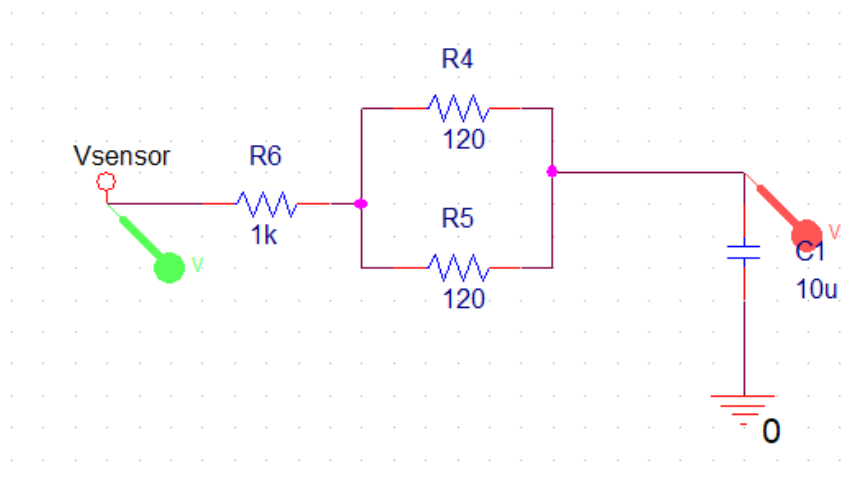
$$-2 \text{ db} = 20 * \log(x) \Rightarrow x = 0.794$$

$$0.794 = \frac{1}{\sqrt{1 + (10/f_c)^2}} \Rightarrow f_c = 13.06 \text{ Hz}$$

Cualquier frecuencia que esté en ese intervalo cumplirá las condiciones de atenuación de cualquiera de las dos frecuencias. Por lo tanto, la frecuencia de corte seleccionada es de 15 Hz. Para esa frecuencia de corte, si se fija el condensador en 10uF, la resistencia tendría un valor de:

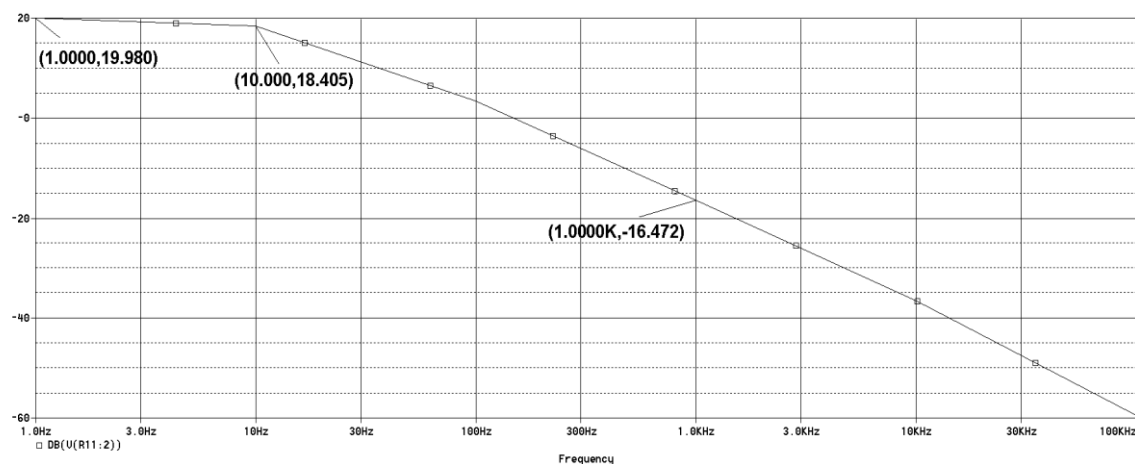
$$R = \frac{1}{2\pi * C * f_c} = 1060 \Omega$$

Por lo tanto, el circuito resultante para esta etapa se muestra en la Figura 4:



4. Filtrado de la señal del sensor

Simulación filtro paso bajo para acondicionamiento del sensor:



5. Bode del filtro de la señal del sensor



Como se observa en la Figura 5, viniendo de una ganancia de 10 ($20 * \log \log (10) = 20dB$), debido a la ganancia establecida por el amplificador operacional del acondicionamiento, en 10 Hz tenemos una atenuación menor de 2 dB ($20 - 18.405 = 1.595dB$) y en 1k tenemos una atenuación de al menos 30dB ($20 - (-16.472) = 36.472dB$). En definitiva, cumple las especificaciones técnicas.

4. Acondicionamiento de la señal del motor

4.1 Filtrado de la señal de la bomba

En esta etapa se trata de filtrar la señal que sale de la placa Arduino, la cual es una señal cuadrada PWM de 490 Hz. La tensión de salida del filtrado será la continua del valor medio de la señal cuadrada, que variará en función del ciclo de trabajo aplicado. Las especificaciones del trabajo indican que la señal que controla la bomba puede variar como máximo en un tiempo de 0.02 segundos, eso corresponde a una frecuencia de 50 Hz. Por lo tanto, los límites de filtrado serán 50 Hz y 490 Hz.

También se especifica que las señales que no sean la de control no podrán ejercer una amplitud mayor a 0.1V después del filtrado. De ahí concluimos que la ganancia en el primer armónico de 490 Hz debe ser de:

$$Ganancia = \frac{0.1}{5} = 0.02$$
$$0.02 = \frac{1}{\sqrt{1 + (490/fc)^2}} \Rightarrow fc = 9.8 Hz$$

Por otro lado, se sabe que las frecuencias menores a 50 Hz no deben de ser atenuadas. Por lo tanto, la máxima atenuación será de -3 dB. Eso indica que la frecuencia de corte es de 50 Hz.

En este caso, el rango de valores de frecuencias de corte no es válido, por lo que se prioriza las frecuencias que no se quieren atenuar. Esto se debe a que, haciendo esta priorización, se podrá implementar un filtro de orden mayor o uno que cumpla las dos condiciones de atenuación. Para no trabajar con valores límites, se elige una frecuencia de corte de 100 Hz, y se fija el condensador en un valor de 1uF. Así la resistencia deberá ser de:

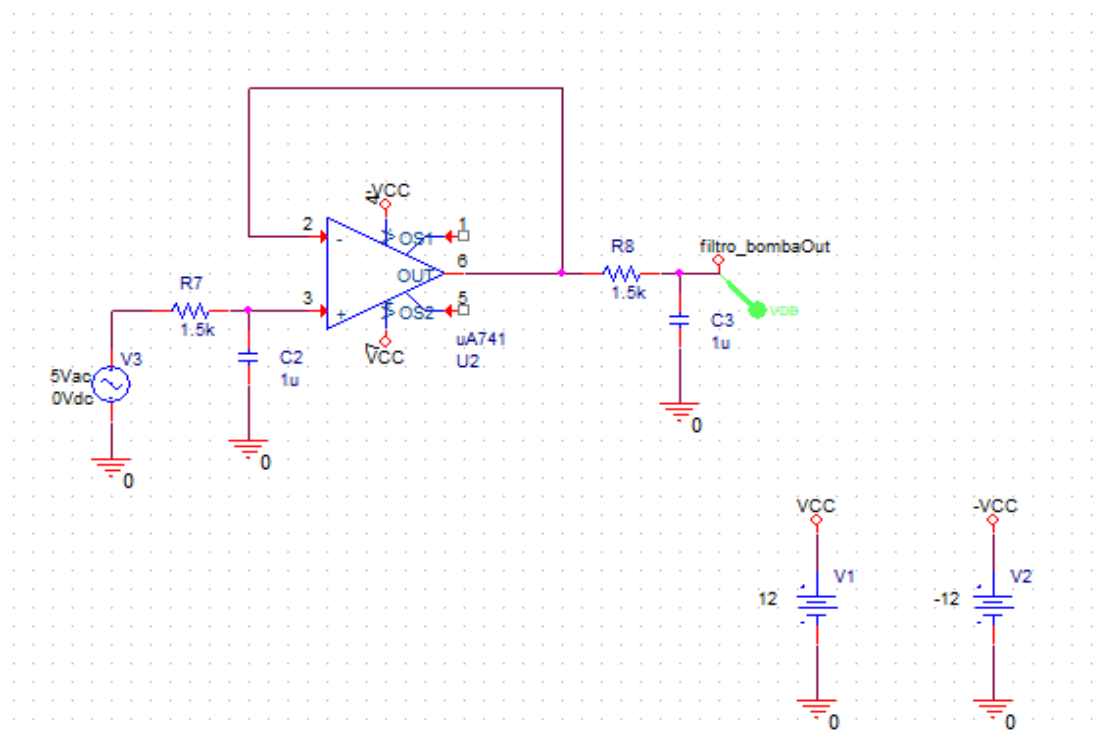
$$R = \frac{1}{2\pi * C * fc} = 1591.5 \Omega$$

Para facilitar la implementación física, se opta por una resistencia de 1.5 kΩ, ya que es un valor comercial, y se recalcula la frecuencia de corte:



$$f_c = \frac{1}{2\pi * C * R} = 106.1 \text{ Hz}$$

Como esa frecuencia está por encima de los 50 Hz, cumple que no atenúa más de 3 dB los 50 Hz. Como dicha frecuencia de corte no se cumple la condición de atenuación de los 490 Hz ($-13.96 \text{ dB} < -33.98 \text{ dB}$), se implementará un filtro de orden 2 concatenando dos filtros con las características calculadas, y se comprobará si cumple o no las dos condiciones de atenuación. De esta manera el circuito resultante sería el mostrado en la Figura 6:

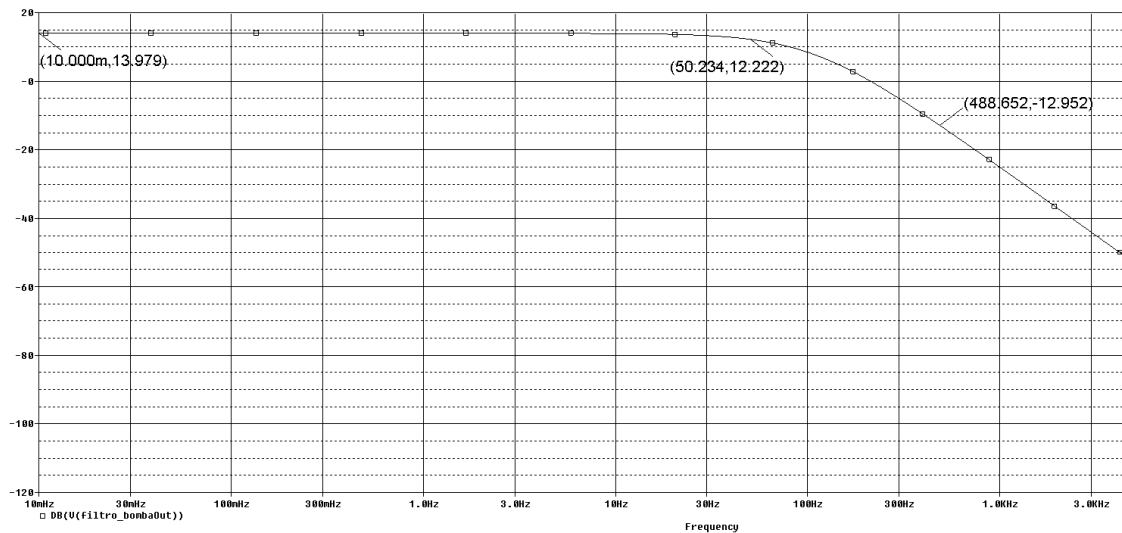


6. Filtro orden dos para la señal de control de la bomba

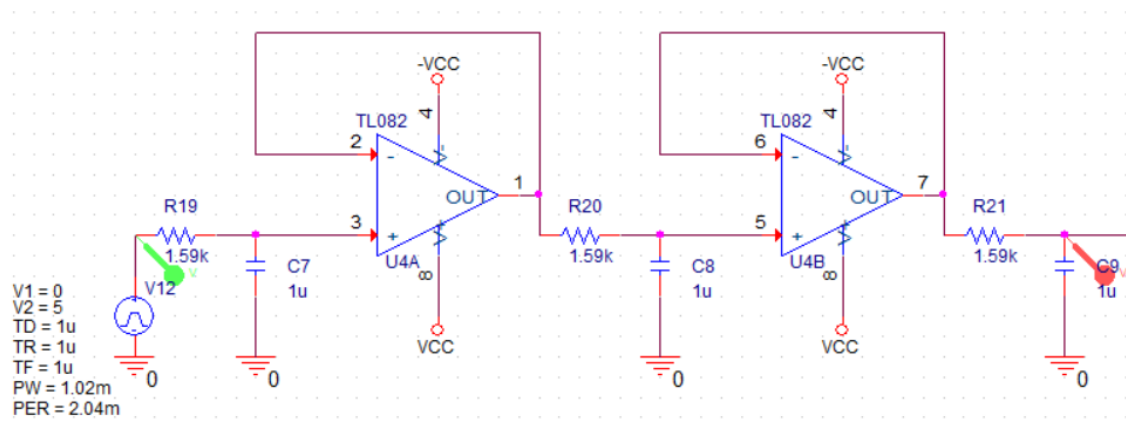
Simulación filtro orden dos de la bomba:

Para comprobar si se cumplen las condiciones, se realiza el diagrama de bode del sistema, con ello se podrá ver qué atenuación tiene cada frecuencia y comprobar si se cumple la restricción.

Como se puede comprobar en la Figura 7, sólo se cumple la condición de no atenuar los 50 Hz, por lo que se procede a implementar un filtro de orden tres concatenando un filtro más al que ya se tenía antes (Figura 8):



7. Bode filtro de orden dos para la señal de control de la bomba

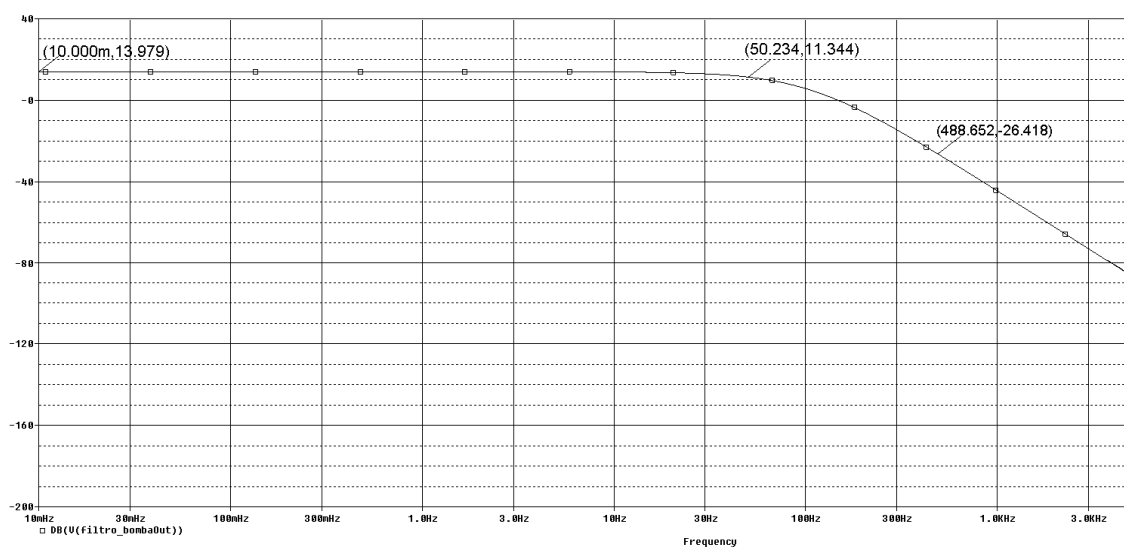


8. Filtro de orden tres para la señal de control de la bomba

Entre cada uno de los filtros se coloca un operacional configurado como seguidor para que no interfieran unos filtros con los otros. En nuestro caso, en un TL082 ya englobamos los dos seguidores de tensión. El ciclo de trabajo en este caso es del 50%.

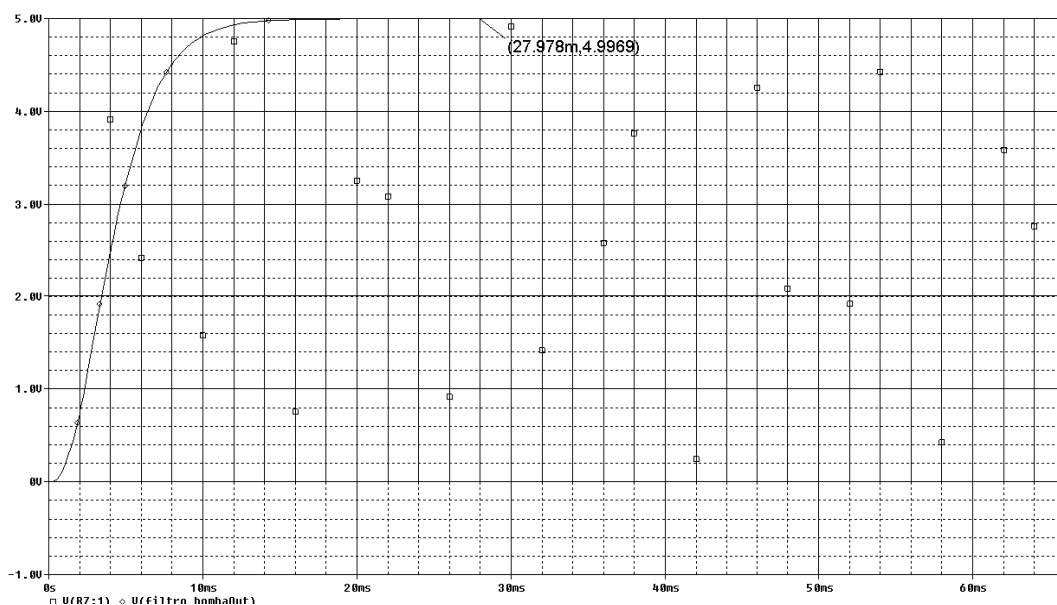
Simulación del filtro de la señal de la bomba:

En la primera simulación se puede ver el bode del sistema de orden 3 (Figura 9), en el que se comprueba que las frecuencias menores de 50 Hz se atenúan menos de 3 dB y las frecuencias mayores de 490 Hz se atenúan más de 33.98 dB, con lo que el filtro diseñado cumpliría las especificaciones técnicas.



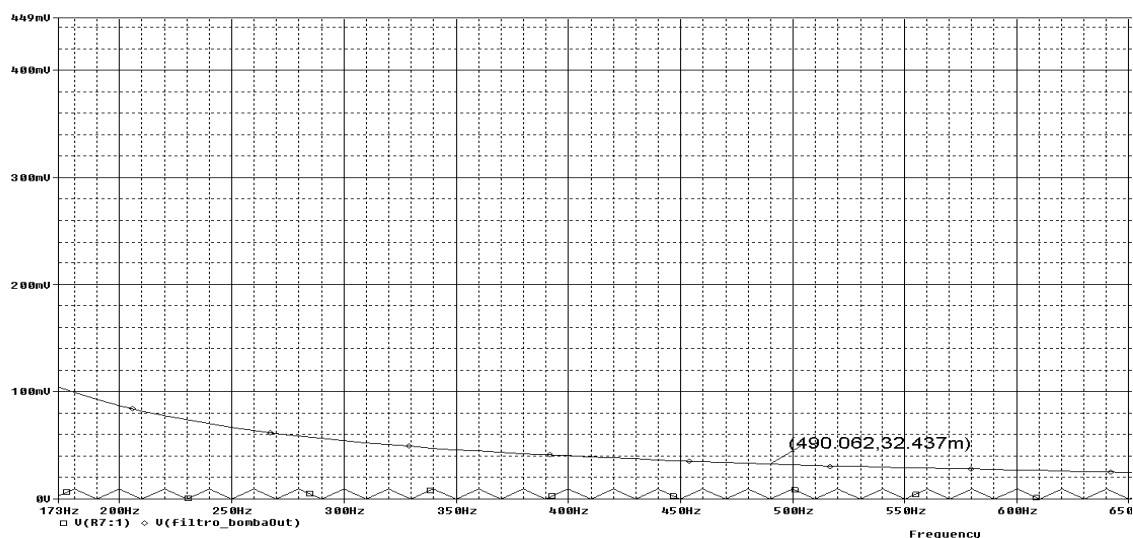
7. Bode filtro orden tres para la señal de control de la bomba

En la segunda simulación (Figura 10) se puede ver la respuesta en el tiempo del circuito, y al estar la fuente a un ciclo de trabajo del 100% se muestra como la señal de salida alcanza los 5V sin problemas provenientes del filtrado de la señal.



8. Respuesta temporal filtro orden tres para la señal de control de la bomba

Y en la última simulación (Figura 11), que es el espectro frecuencial de la señal, muestra como en 490 Hz hay una pequeña señal de 32mV, pero que no excede los 0.1 V que se especificaba en el trabajo, por lo tanto, el filtrado funciona.



9. Espectro frecuencial filtro de orden tres para la señal de control de la bomba

5. Amplificación de corriente

En este apartado se amplifica la corriente proveniente del filtrado de 3º orden. Con la finalidad de poder alimentar la bomba de agua en base a la curva proporcionada por el enunciado del trabajo que relaciona la corriente por el motor con la velocidad de este.

Inicialmente se estudia qué intensidad máxima podrían aguantar los operacionales ua741 utilizados en el filtrado. Tal y como se visualiza en la siguiente Figura 12, como máximo se puede trabajar a una $i=40\text{mA}$ a la salida del amplificador.

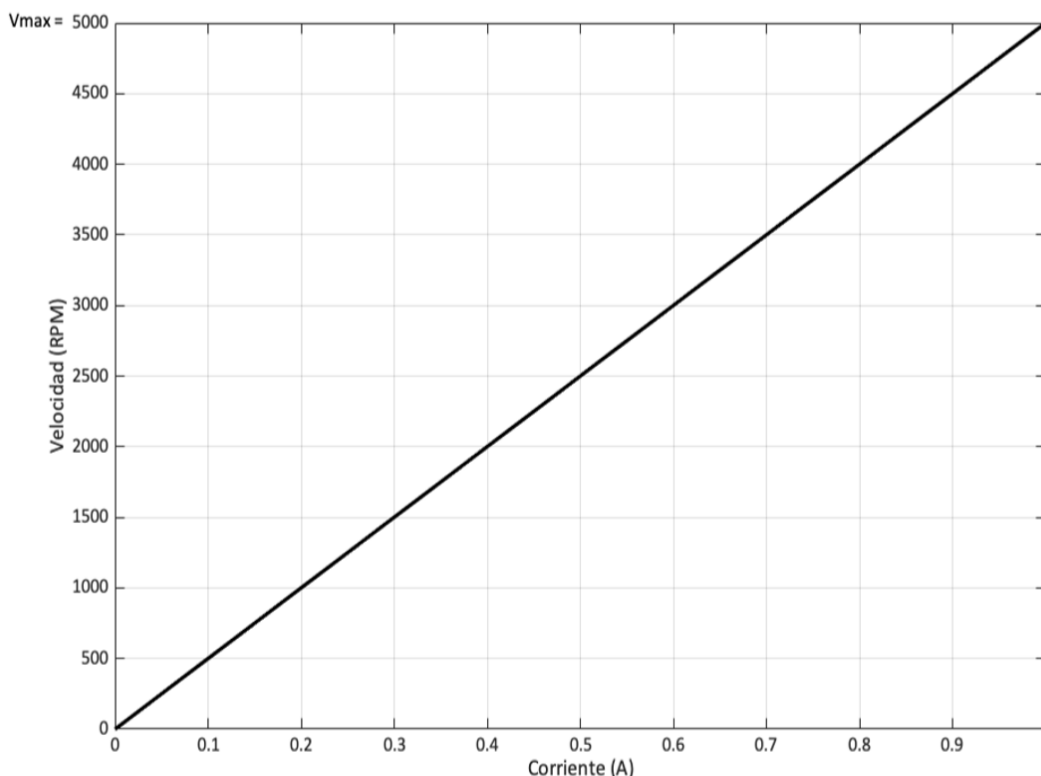
PARAMETER	TEST CONDITIONS	T_A^\dagger	μA741C			$\mu\text{A7411}, \mu\text{A741M}$			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$	25°C		1	6		1	5	mV
		Full range			7.5			6	
$\Delta V_{IO}(\text{adj})$ Offset voltage adjust range	$V_O = 0$	25°C		± 15			± 15		mV
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$	25°C		20	200		20	200	nA
		Full range			300			500	
I_{IB} Input bias current	$V_O = 0$	25°C		80	500		80	500	nA
		Full range			800			1500	
V_{ICR} Common-mode input voltage range		25°C	± 12	± 13		± 12	± 13		V
		Full range	± 12			± 12			
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C	± 12	± 14		± 12	± 14		V
	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	Full range	± 12			± 12			
	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	25°C	± 10	± 13		± 10	± 13		
	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	Full range	± 10			± 10			
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	20	200		50	200		V/mV
	$V_O = \pm 10\text{ V}$	Full range	15			25			
r_i Input resistance		25°C	0.3	2		0.3	2		M Ω
r_o Output resistance	$V_O = 0$, See Note 5	25°C		75			75		Ω
C_i Input capacitance		25°C		1.4			1.4		pF
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	25°C	70	90		70	90		dB
		Full range	70			70			
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	$V_{CC} = \pm 9\text{ V to } \pm 15\text{ V}$	25°C		30	150		30	150	$\mu\text{V/V}$
		Full range			150			150	
I_{OS} Short-circuit output current		25°C		± 25	± 40		± 25	± 40	mA
I_{CC} Supply current	$V_O = 0$, No load	25°C		1.7	2.8		1.7	2.8	mA
		Full range			3.3			3.3	
P_D Total power dissipation	$V_O = 0$, No load	25°C		50	85		50	85	mW
		Full range			100			100	

10. Datasheet amplificador operacional UA741



Por este motivo se utiliza un amplificador de corriente, ya que los operacionales no aguantarían la intensidad necesaria para trabajar con la bomba de agua.

Para amplificar la corriente se usará un transistor bipolar (BJT) NPN de potencia. Hay que tener en cuenta que la bomba de agua trabaja en un rango entre 0A y 1A, y que, en función de la intensidad de entrada, trabajará a una velocidad mayor o menor. La gráfica que se debe obtener será la siguiente (Figura 13):

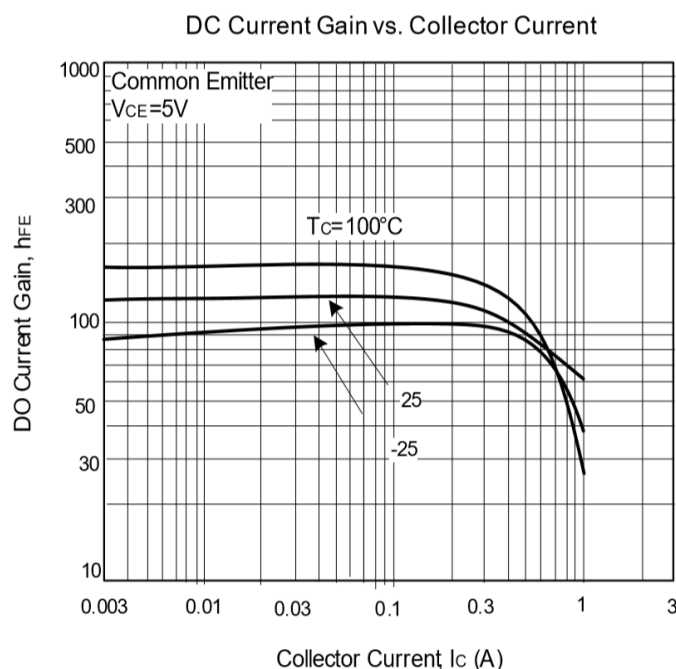


11 Curva corriente velocidad de la bomba

Cabe destacar, que con un transistor de potencia nunca se podrá llegar a alcanzar la linealidad perfecta, debido a las curvas características tensión corriente de cada transistor.

Para este trabajo se necesita un transistor que soporte una intensidad por el colector máxima de 1A (I_C), ya que es la corriente máxima se le proporcionará a la bomba. En un principio se prueba un transistor 2SC4793, que cumple con las características establecidas, pero no alcanza una linealidad eficaz, debido a la gran variación que sufre la ganancia del transistor (h_{FE}) en función de la intensidad de colector.

Como se puede visualizar en la Figura 14 la ganancia del transistor de 0.3A a 1A sufre demasiada variación:



12. Curva corriente de colector frente a ganancia transistor 2SC4793

Por lo tanto, se busca un transistor que resista mayor intensidad en el colector y que por lo menos, de 0A a 1A (el rango de trabajo requerido), apenas variará la ganancia del transistor.

Se emplea un transistor 2SCR574D3, con las siguientes características (Figura 15):

● **Absolute maximum ratings** ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Values	Unit
Collector-base voltage	V_{CBO}	80	V
Collector-emitter voltage	V_{CEO}	80	V
Emitter-base voltage	V_{EBO}	6	V
Collector current	I_C	2	A
	I_{CP}^{*1}	4	A
Power dissipation	P_D^{*2}	10	W
Junction temperature	T_j	150	$^\circ\text{C}$
Range of storage temperature	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

13. Datasheet transistor 2SCR574D3

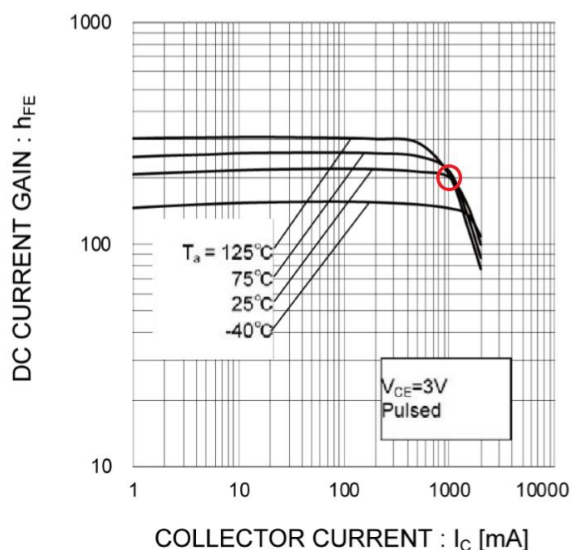
Teniendo en cuenta estas características y los datos proporcionados por las curvas características se realizan los cálculos de R_C y la R_B . Para realizar dichos cálculos se usarán las siguientes fórmulas:

1. $V_{CE} = -I_{colector} \times R_{colector} + V_{CC}$
2. $I_{colector} = I_{base} \times \beta$
3. $V_{base} - V_{BE} = I_{base} \times R_{base}$



Al observar la siguiente gráfica (Figura 16) se obtiene la Ganancia de corriente (β) en base a la máxima intensidad de colector que se necesitará (1A).

Fig.3 DC Current Gain vs. Collector Current(I)

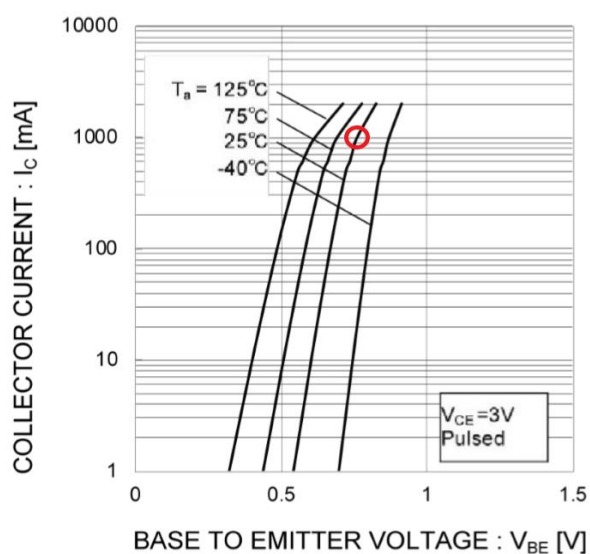


14. Curva corriente colector frente a ganancia transistor 2SCR574D3

En este caso, para una $T_a = 25^\circ\text{C}$, se obtiene una $\beta = 202$.

En base a la siguiente gráfica (Figura 17), se saca para la máxima intensidad con la que se trabaja (1A) la caída de tensión base-emisor (V_{BE}). $V_{BE} = 0.75$.

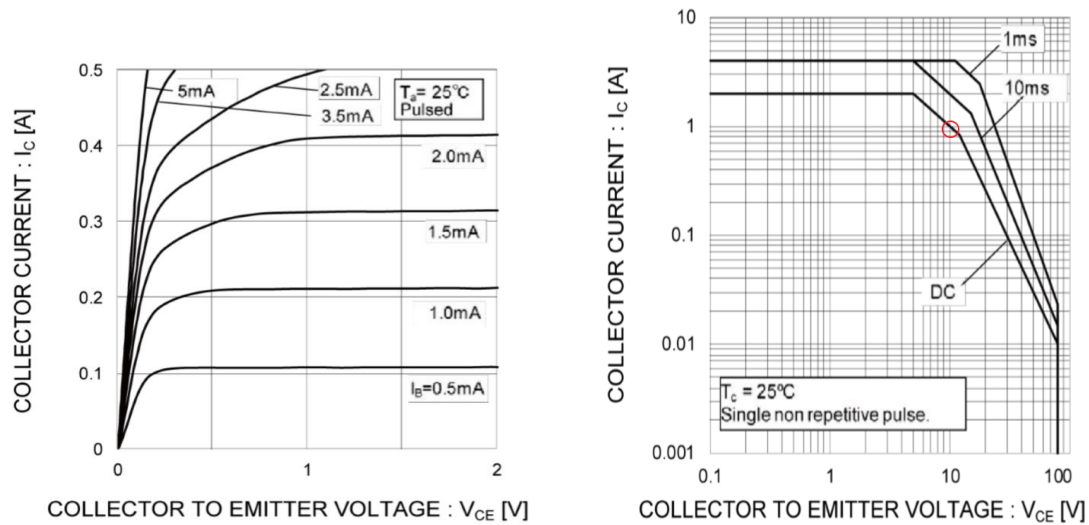
Fig.1 Grounded Emitter Propagation Characteristics



15. Curva tensión base emisor frente a corriente de colector transistor 2SCR574D3



Siguiendo las siguientes gráficas (Figura 18) se puede obtener la caída de tensión entre el colector y el emisor (V_{CE}). En este caso para 1A, tenemos una $V_{CE} = 9.6$.



16. Curvas tensión colector emisor frente a corriente de colector

Con estos datos se pueden calcular las resistencias de nuestro transistor, teniendo en cuenta que para la V_B y para la I_C se aplicarán los valores máximos:

$$V_{base} = 5V$$

$$I_{colector} = 1A$$

$$I_{colector} = I_{base} \times \beta \rightarrow I_{base} = \frac{1A}{202} = 4.95m$$

$$V_{base} - V_{BE} = I_{base} \times R_{base} \rightarrow R_{base} = \frac{5 - 0.75}{4.95mA} = 858.6 \Omega$$

$$V_{CE} = -I_{colector} \times R_{colector} + V_{CC} \rightarrow R_{colector} = \frac{9.6 - 12}{-1} = 2.4 \Omega$$

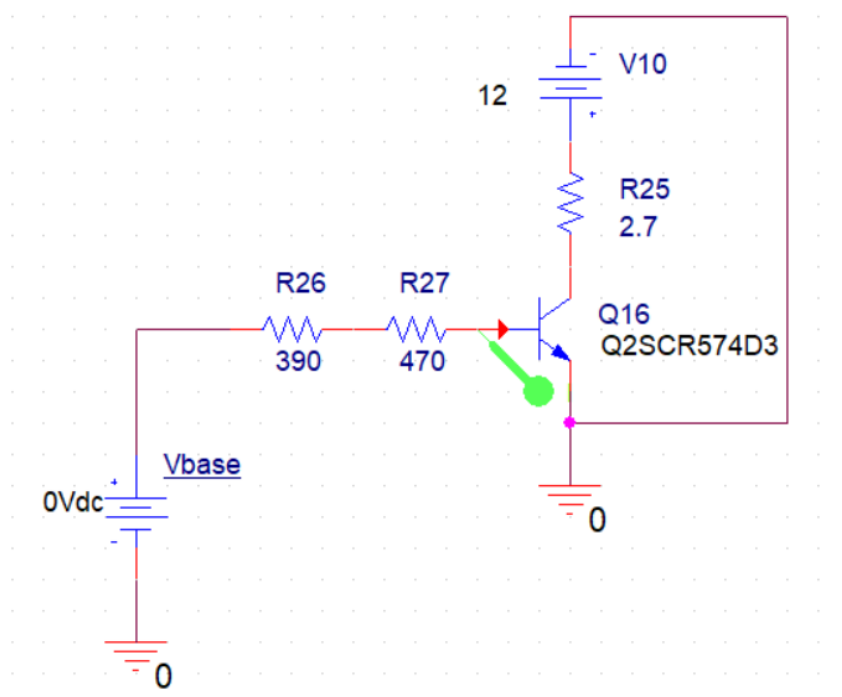
Para simplificar la implementación del circuito físico se emplearán resistencias comerciales, por lo tanto los nuevos valores de estas serán:

$$R_B = 860 \Omega = 390 \Omega + 470 \Omega$$

$$R_C = 2.7 \Omega$$



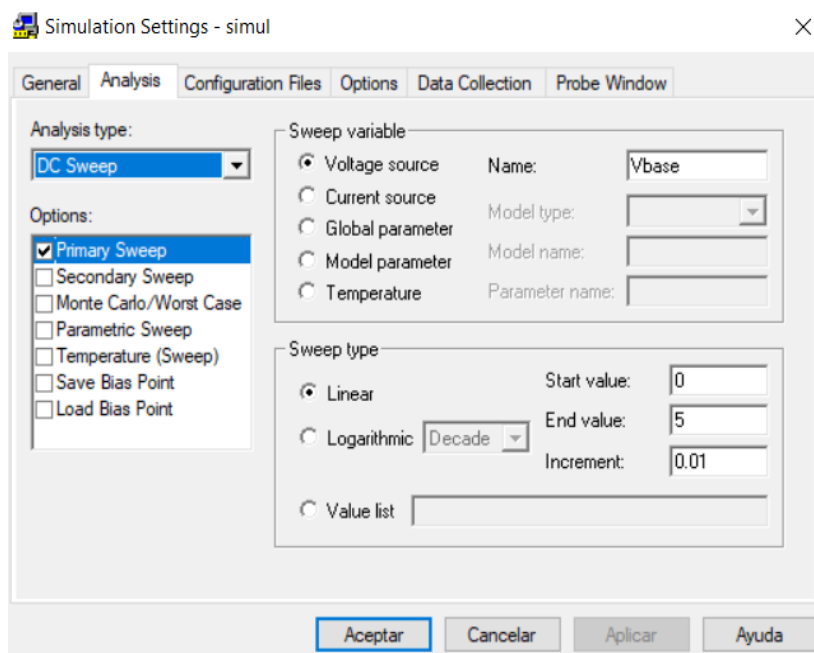
En la Figura 19 se puede visualizar el transistor con sus componentes comerciales:



17. Circuito de amplificación de corriente

Simulaciones:

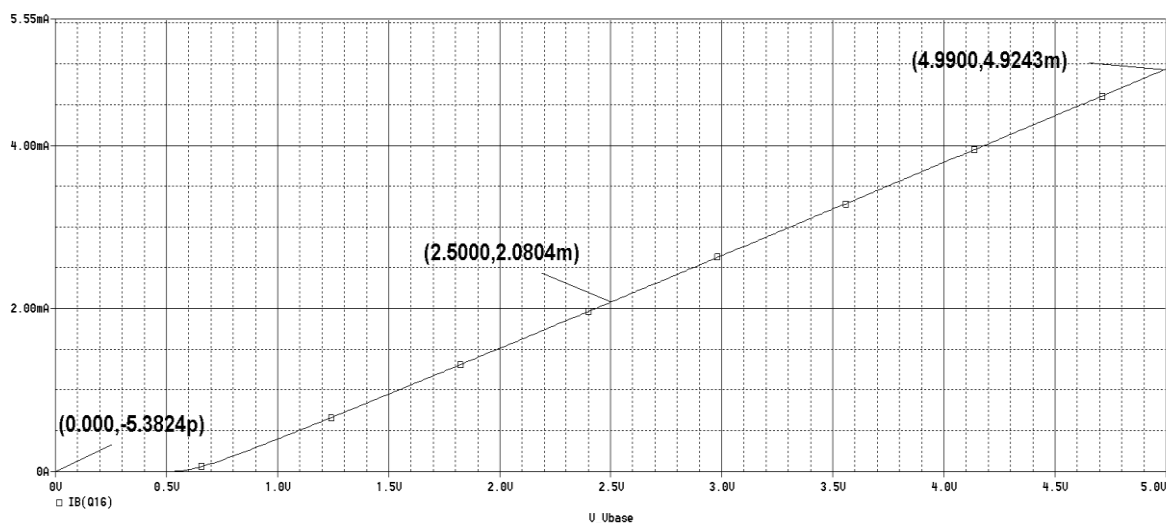
Aplicando un barrido de voltaje en la fuente V_B de 0V a 5V, se puede medir la I_B en función del voltaje de entrada V_B . En la Figura 20 se visualizan los parámetros aplicados en el barrido:



18. Configuración de la simulación de barrido en voltaje



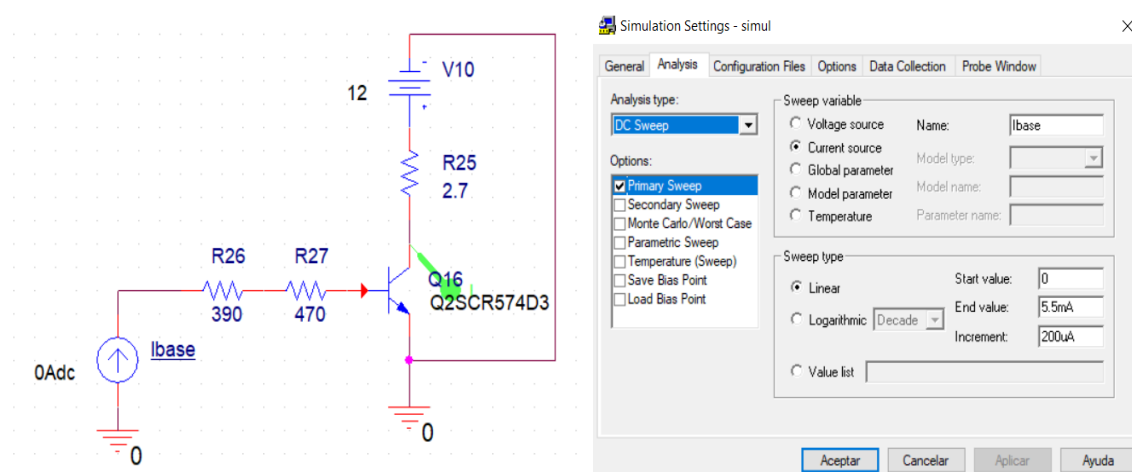
En la figura 21 se muestra la simulación del barrido:



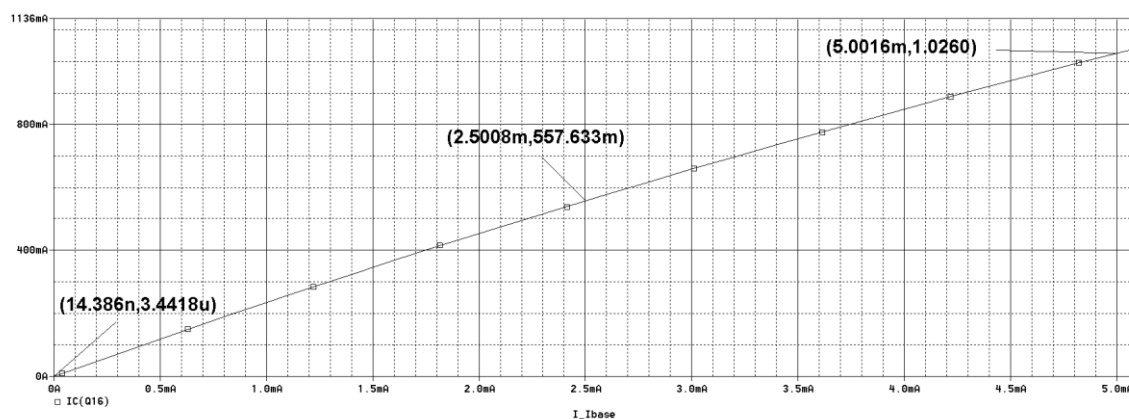
19. Simulación de barrido en voltaje

Como se puede visualizar, existe una linealidad bastante efectiva con este transistor. Hay que tener en cuenta, que la I_B se va a amplificar por un factor prácticamente constante (β). En el caso de este transistor para una intensidad de colector que no supere 1 A.

A continuación, tras aplicar un barrido de corriente en la fuente I_B siguiendo los parámetros mostrados en la Figura 22, comprobamos en base a la simulación en la Figura 23 que si la gráfica I_C/I_B es prácticamente lineal:

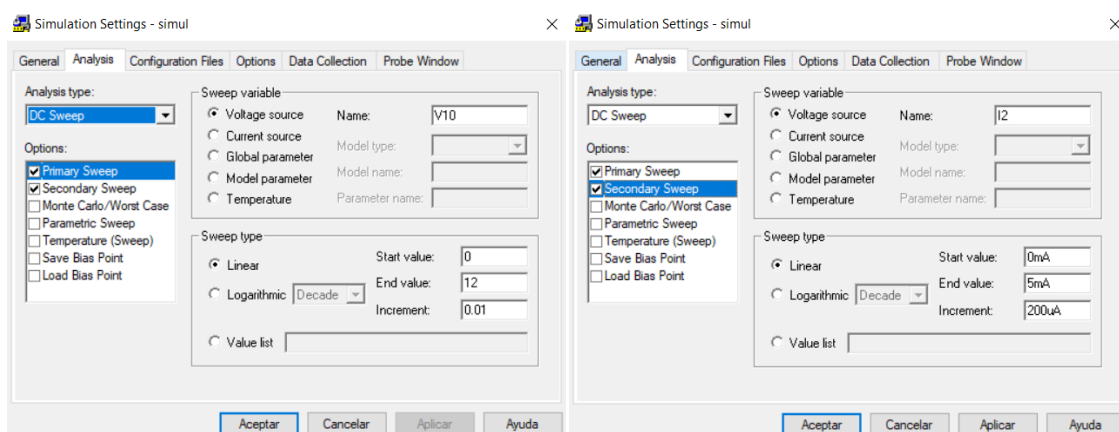


20. Circuito amplificador corriente con fuente de corriente y su configuración de barrido



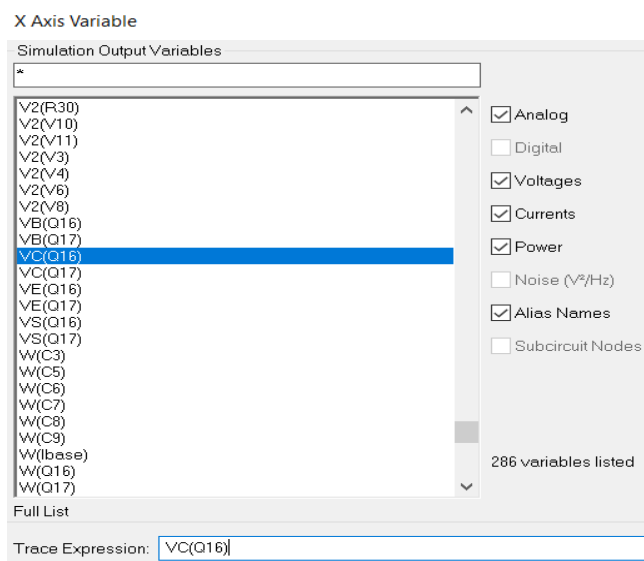
21. Simulación barrido en corriente

Para visualizar las curvas de salida del transistor, se realiza un doble barrido. En el primario se varía la tensión de alimentación para que la V_{CE} varíe; y en el secundario, se varía la corriente de base. Se pueden visualizar los parámetros ejercidos en la Figura 24:



22. Configuraciones simulación barrido en tensión y en corriente

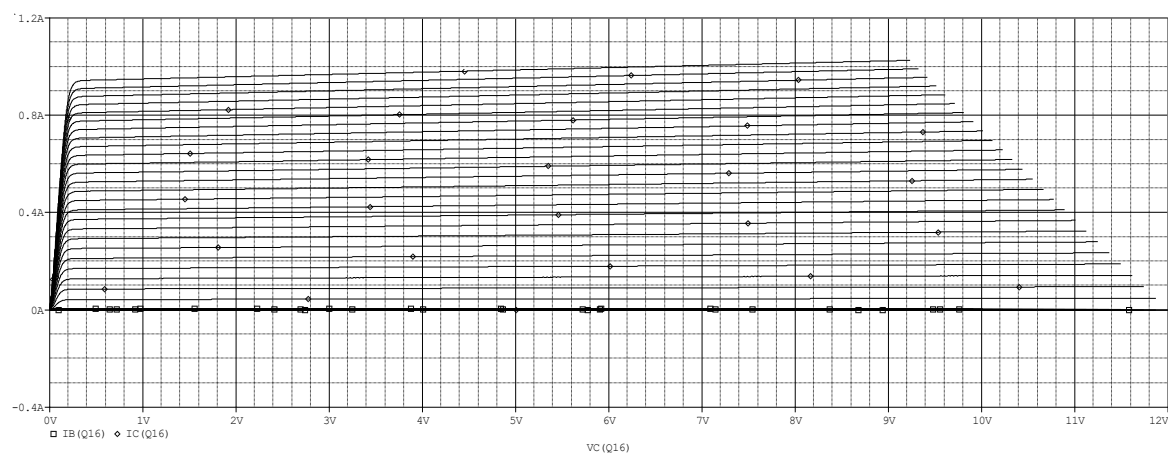
En la Figura 25 se visualiza la configuración del eje x para la simulación:



23. Configuraciones simulación barrido en tensión y en corriente

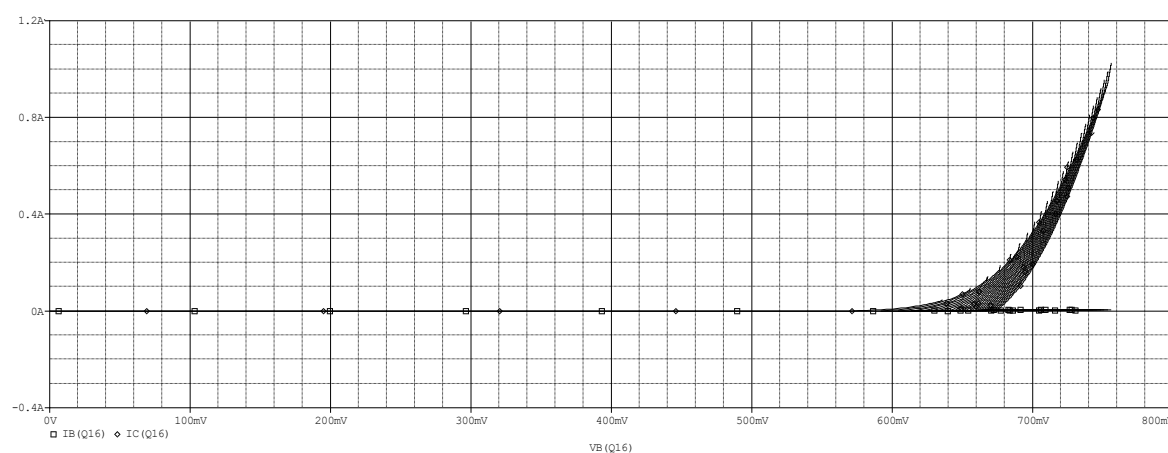


Se modifica el eje x, en vez de variarlo según la V_{CC} de alimentación, se varía I_C en función de la V_{CE} . Teniendo en cuenta que la $V_E = 0$. Se visualiza la curva de salida del transistor en la siguiente Figura 26:

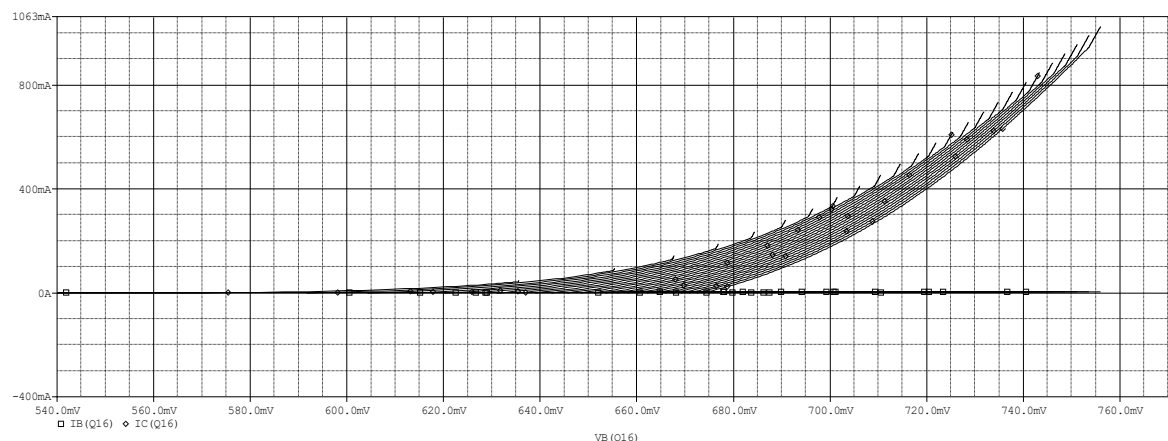


24. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión colector emisor

Por último, se puede ver la gráfica que varía I_C en función de V_{BE} (Figuras 27-28), (sería seguir los mismos pasos que en la gráfica anterior, pero en lugar de marcar $V_C(Q16)$, marcar $V_B(Q16)$ en la configuración del eje x).



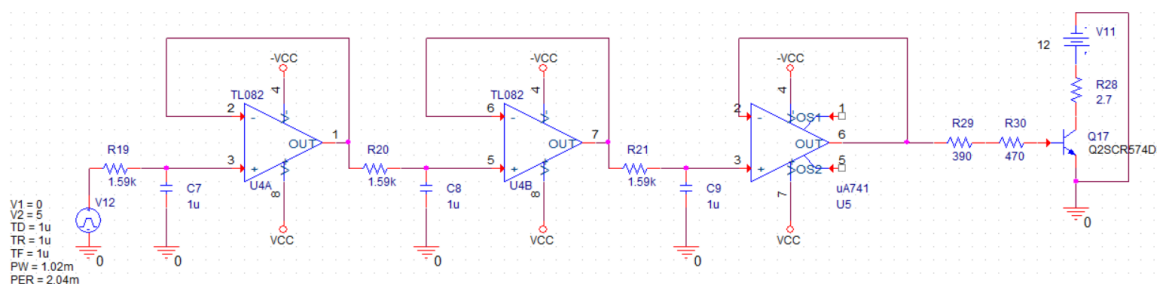
25. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión base emisor



26. Curvas de la corriente de colector en función de la tensión base emisor con zoom



Una vez realizados todos los cálculos y comprobaciones, el circuito completo de acondicionamiento de la bomba sería el mostrado en la Figura 29:



27. Circuito de acondicionamiento de la bomba

6. Diseño de placa PCB

Para este apartado se usará el software EAGLE de Autodesk. Con él se creará una placa en la que se implementará el circuito completo diseñado con OrCAD. Para la realización de la PCB y como tiene un uso específico, se ha decidido usar asociaciones de resistencias comerciales tal como se hizo con el diseño en OrCAD. Para poder representar la placa de forma que pueda ser creada físicamente, habrá que calcular los anchos de pista necesaria para cada situación, ya que algunas de estas pistas tendrán que transportar intensidades de hasta 1 A.

Para ello recurrimos a una calculadora online. Así pues, calcularemos el caso más significativo, el de la pista I_{OUT} , debido a que es la más larga y la que más intensidad va a soportar. Para calcular esa anchura resulta necesario introducir unas condiciones de trabajo, las cuales se presentan a continuación en la Figura 30:

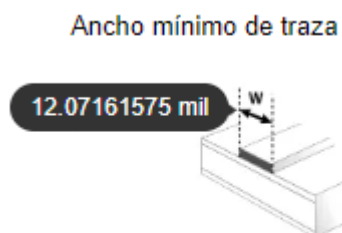
Corriente	<input type="text" value="1.015"/>	<input type="text" value="A"/>
Espesor	<input type="text" value="0.035"/>	<input type="text" value="mm"/>
Aumento de temperatura	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="°C"/>
Temperatura ambiente	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="°C"/>
Longitud de trazo	<input type="text" value="4458"/>	<input type="text" value="mil"/>

28. Condiciones para el cálculo del ancho mínimo de pista

En este caso se opta por una temperatura ambiente de 25°C y un incremento máximo permitido de 10°C. Con estas condiciones de trabajo se calcula que el ancho de pista



mínimo requerido para una vía externa, tanto de la capa Top o de la capa Bottom, es de (Figura 31):



Capas externas en el aire

29. Resultado del ancho mínimo de pista

A su vez, debemos atender también a otras posibles restricciones, por lo que se opta por hacer caso de una restricción general que aparece en el siguiente libro:

Pareja Aparicio, M., 2010. *Diseño Y Desarrollo De Circuitos Impresos Con Kicad*. Madrid: RC Libros. Recuperado de: http://www.rclibros.es/pdf/cap_KiCad.pdf

En la página 12 del mismo, indica que para corrientes menores a 300 mA es necesario un mínimo de 0,3 mm de ancho de pista. Y siempre que se use una técnica de micro fresado. En caso de no usar esa técnica, el ancho mínimo sería de 0,5 mm. Por tanto, se recurre a un conversor para asegurarnos de que se cumplen ambas restricciones:

Longitud	
12,07	= 0,306578
Mil	Milímetro

30. Conversión de mils a mm para comprobar restricciones

De forma que para las pistas en las que la intensidad es de 1.015 A, se necesita un ancho de pista mayor al mínimo requerido como norma general (Figura 32-33). Para evitar un ajuste al límite, se selecciona un ancho de pista de 12.5 mils.

11,811	= 0,3
Mil	Milímetro

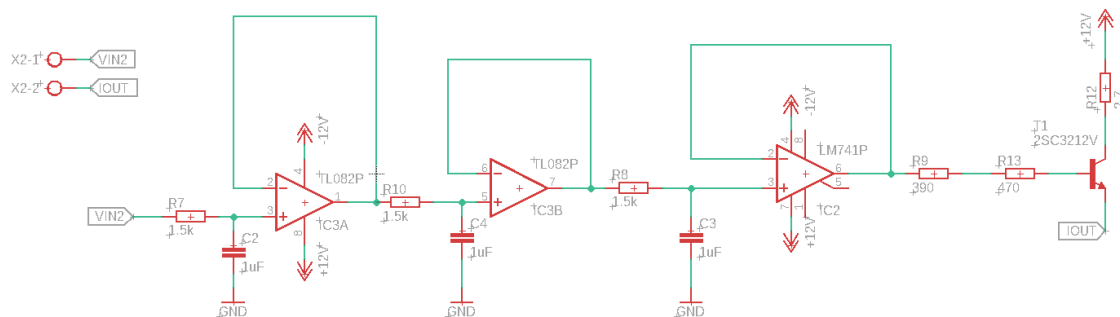
31. Conversión de mils a mm para comprobar restricciones 2

Se comprueba así, que seleccionando un ancho de pista de 12 mils sí que se cumplen las restricciones. Por lo tanto, a la hora de fabricar este componente sería necesario aplicar una técnica de micro fresado.



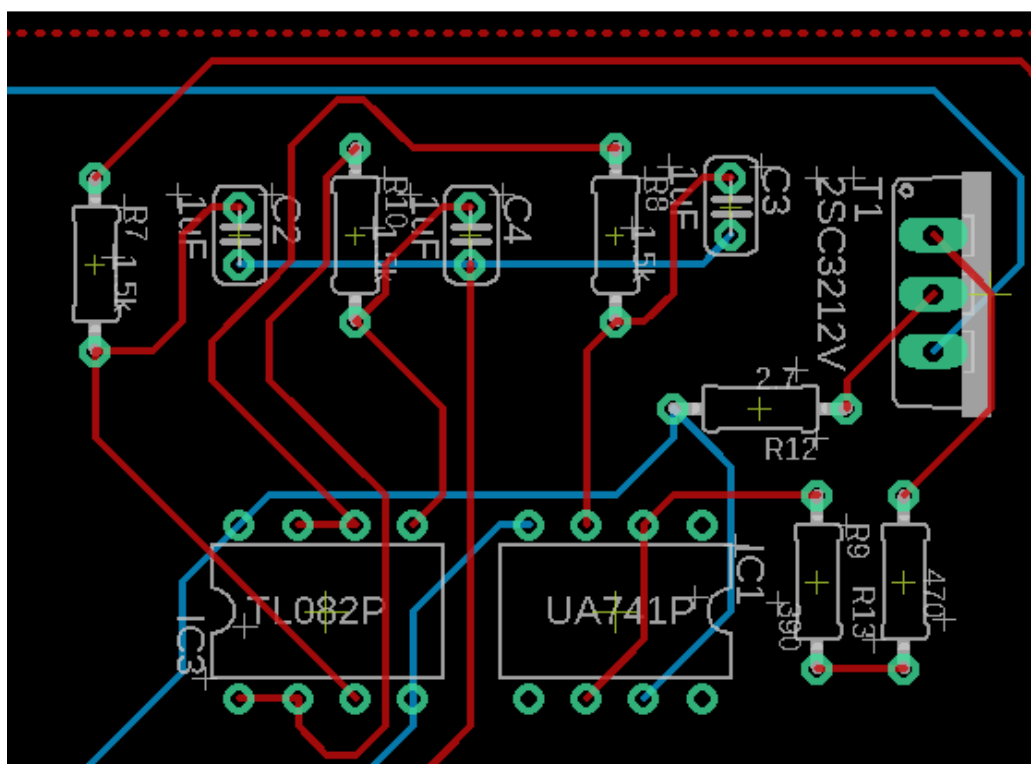
6.2 Segunda Etapa

Para esta etapa se utilizaron únicamente dos conectores (Figura 36), pero necesarios ambos. El resto estaban contemplados en la primera etapa.



34. Esquemático segunda etapa del circuito en EAGLE

Se utilizaron las etiquetas V_{IN2} e I_{OUT} para simbolizar los conectores, para las conexiones de la señal que le entra al sistema desde el Arduino y para la corriente de salida que va a la bomba de agua respectivamente. Por lo tanto, la parte de la placa correspondiente a la segunda etapa es la reflejada en la Figura 37:



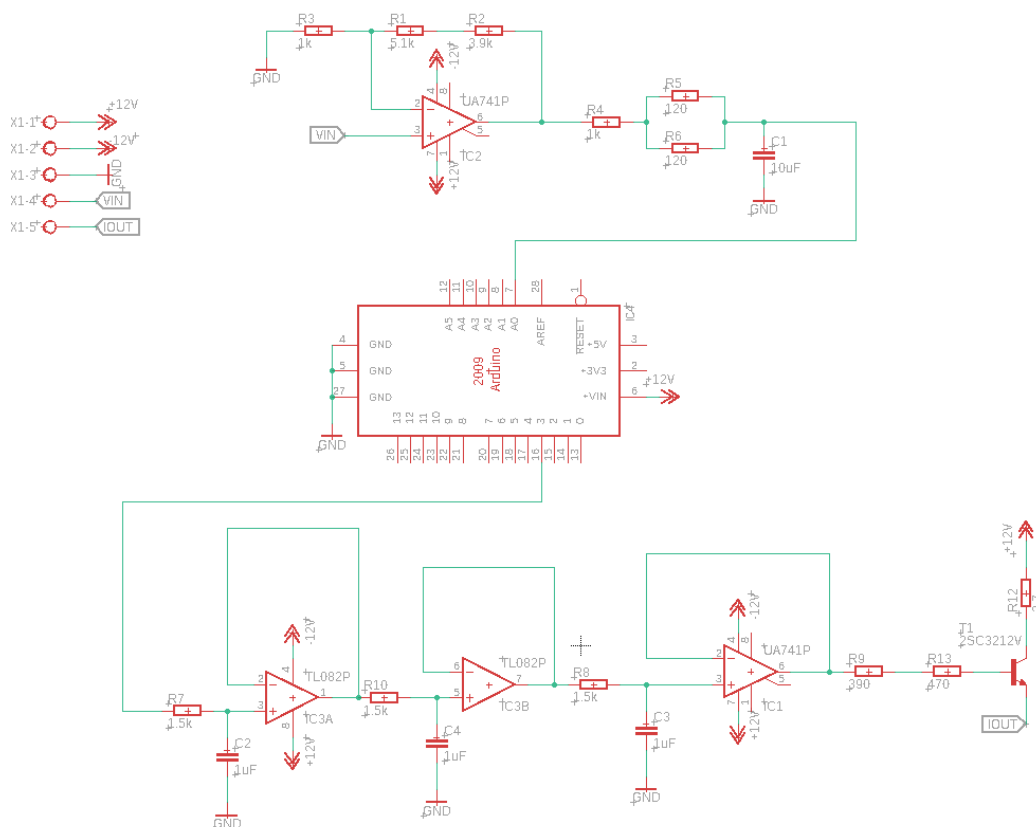
35. PCB de la segunda etapa del circuito en EAGLE

Debido a la complejidad del conexionado, fue necesario usar la capa 'Bottom' para realizar alguna conexión. Estas conexiones están representadas en azul, frente a las rojas de la capa 'Top'.



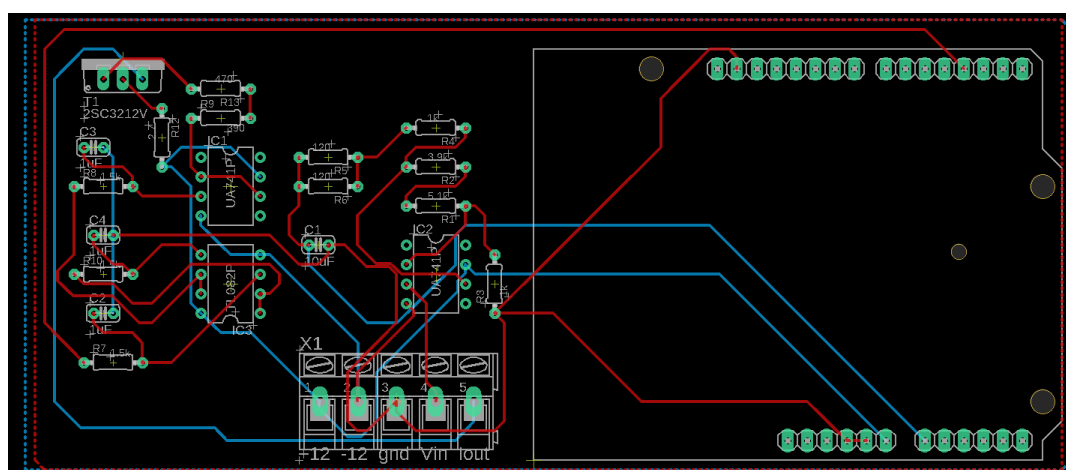
6.3 Etapa Final con Arduino

Esta etapa consiste en la unión de las dos anteriores para crear el circuito completo junto a la placa Arduino, tanto en el esquemático como en la placa. De esta forma el diseño quedaría de la siguiente manera como bien muestra la Figura 38:



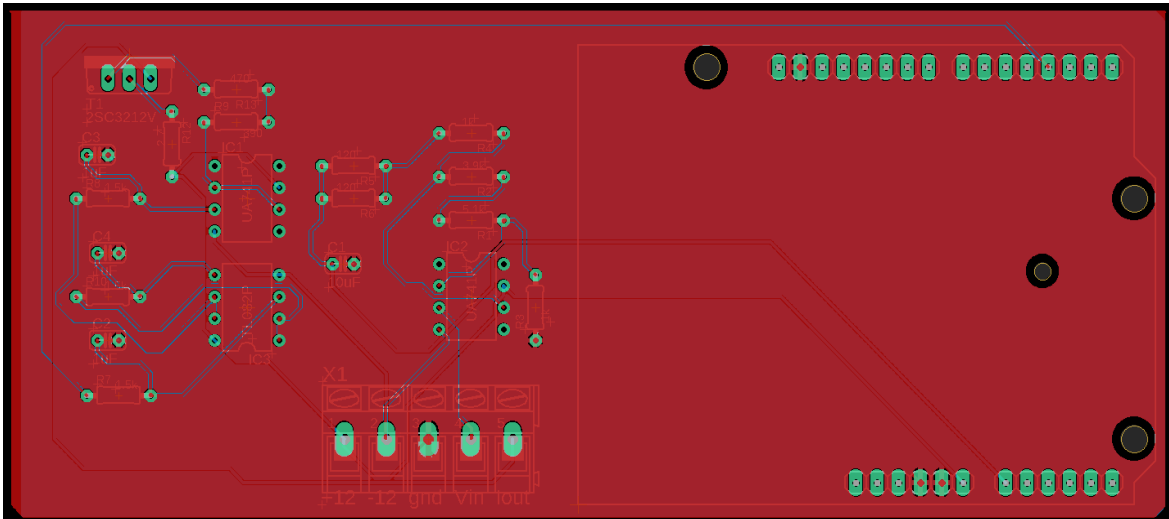
36. Esquemático del circuito completo en EAGLE

Dando, así, lugar a la siguiente PCB (Figura 39):

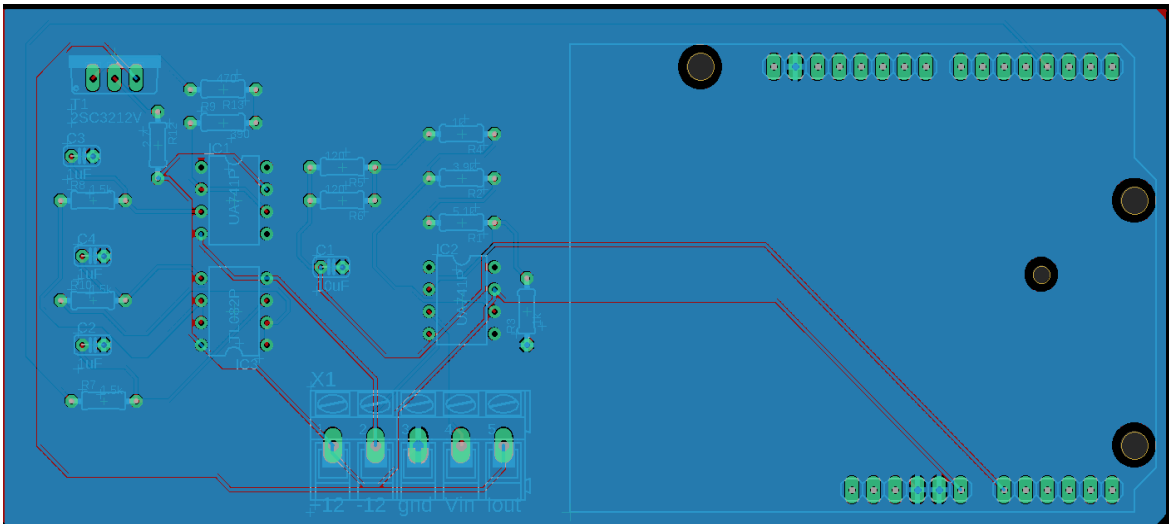


37. PCB circuito completo en EAGLE

Aquí se puede observar el resultado final de la placa que se utilizará en el montaje del sistema. El último paso a realizar sería añadirle el plano de masa con lo que el resultado cambiaría al siguiente aspecto (Figura 40-41):



38. Plano de masa aplicado a la capa 'Top'

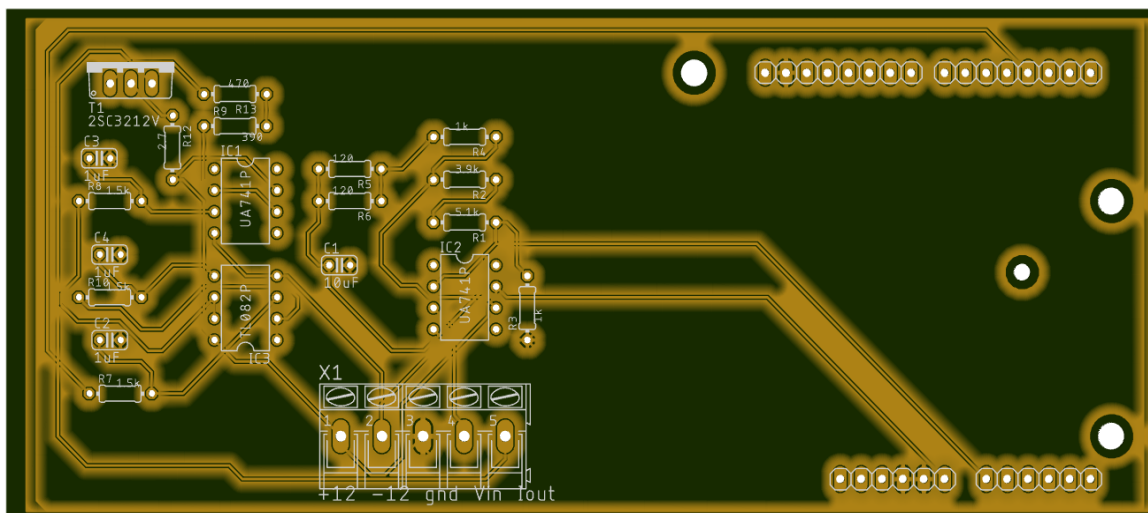


39. Plano de masa aplicado a la capa 'Bottom'

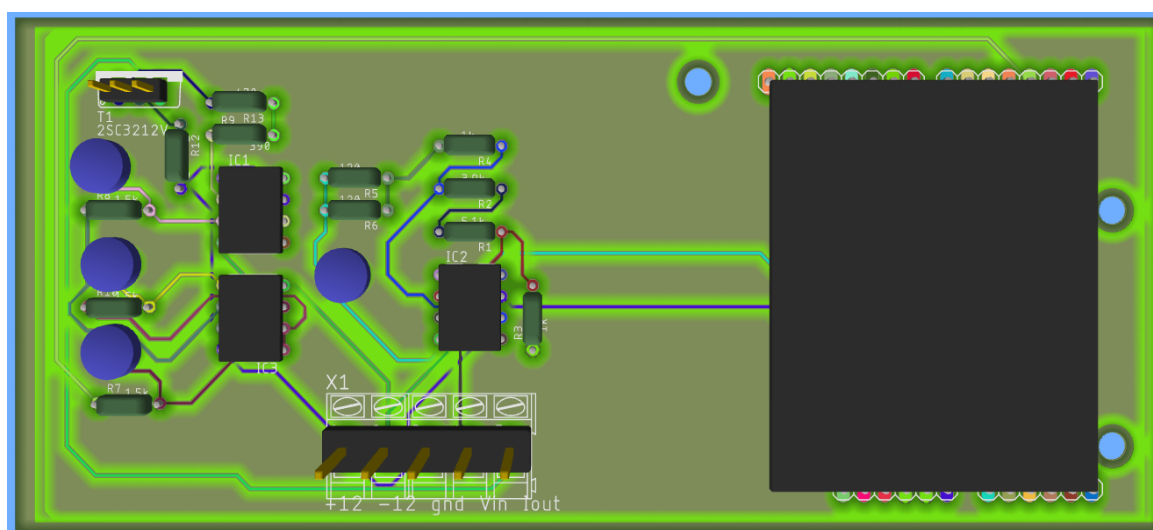


6.4 PCB en 3D

En este apartado podemos visualizar en 3D nuestra PCB junto al Arduino (Figura 42 sin componentes, Figura 43 con componentes):



40. PCB 3D sin componentes



41. PCB 3D con componentes



7. Bibliografía

Pareja Aparicio, M., 2010. *Diseño Y Desarrollo De Circuitos Impresos Con Kicad*. Madrid: RC Libros. Recuperado de: http://www.rclibros.es/pdf/cap_KiCad.pdf

<https://www.pcpaudio.com/pcpfiles/transistores/transistores.html>

<https://www.pspice.com/discrete/bipolar-transistor/power?page=10>

<http://umh1221.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/266/2013/05/Pr%C3%A1ctica-3.-Transistores-PSpice-pr%C3%A1ctica-completa.pdf>

<https://www.mouser.es/datasheet/2/348/2scr574d3fratl-e-1803525.pdf>

<https://www.pspice.com/models/rohm>