

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Medidor de pH



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Jorge Montiel Saenz

Ignacio Raúl Matías Maestro

Pamplona, 26 de Junio de 2015



MEDICIÓN DE PH

## Resumen

El objetivo de este proyecto es la adquisición y tratamiento de la señal de un sensor de pH.

Se ha partido de un modelo comercial y se ha rediseñado para adaptarlo a una sonda específica. En primer lugar, se diseña el nuevo esquemático. Luego se pasa a un programa de simulación electrónica para comprobar el correcto funcionamiento. Una vez comprobado se monta un primer prototipo para hacer pruebas reales. En lo que ha hardware se refiere el último paso es diseñar una placa de circuito impreso como prototipo final.

Por último, se ha implementado comunicación SPI con un Arduino para poder ver los valores de pH en el ordenador en tiempo real.

## Índice

1.	Introducción .....	8
2.	Objetivo .....	9
3.	Alcance.....	9
4.	Sensor .....	10
4.1.	Que es el pH.....	10
4.2.	Sensores de pH .....	10
4.2.1.	Electrodos de vidrio.....	11
4.2.2.	ISFET.....	12
4.2.3.	Electrodo usado.....	13
5.	Desarrollo .....	14
5.1.	Análisis .....	14
5.1.1.	Primera etapa .....	14
5.1.2.	Segunda etapa .....	15
5.2.	Modificaciones.....	17
5.2.1.	Amplificador Operacional.....	17
5.2.2.	Compensación del <i>offset</i> del sensor.....	18
5.3.	Cálculos teóricos.....	18
5.3.1.	Primera etapa .....	19
5.3.2.	Segunda etapa .....	21
5.4.	Inversor .....	22
5.5.	Convertidor Analógico Digital .....	24
5.6.	Simulaciones .....	25
5.7.	Montaje en placa perforada .....	27

MEDICIÓN DE PH

5.8.	PCB .....	28
5.9.	Comunicación SPI.....	32
5.10.	Resultados finales.....	34
6.	Posibles mejoras.....	37
6.1.	ISFET .....	37
6.2.	Compensación de temperatura .....	37
7.	Líneas futuras .....	38
8.	Conclusiones.....	39
9.	Bibliografía.....	40
9.1.	Sistema original.....	40
9.2.	Información general.....	40
9.3.	Hojas de características .....	40
9.4.	Comunicación SPI.....	40
10.	Anexos .....	41
10.1.	Anexo 1.Hoja de características HI 1286.....	41
10.2.	Anexo 3. Esquemático .....	42
10.3.	Anexo 4. Código de Arduino.....	43
10.4.	Anexo 5. Presupuesto .....	44

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. NC-DC Dip Coater .....	8
Ilustración 2. Escala de pH .....	10
Ilustración 3.Sonda de vidrio .....	11
Ilustración 4. Esquemático del funcionamiento de un ISFET .....	12
Ilustración 5. Sensibilidad del sensor . .....	13
Ilustración 6. pH meter V1.0 .....	14
Ilustración 7. Primera etapa original .....	15
Ilustración 8. Segunda etapa original .....	16
Ilustración 9. Rama de compensación de offset .....	18
Ilustración 10. Rangos de tensión .....	18
Ilustración 11. Primera etapa .....	19
Ilustración 12. Segunda etapa .....	21
Ilustración 13. TC1044 como Inversor simple .....	22
Ilustración 14. Rizado en Vout.....	23
Ilustración 15. Ruido alimentado desde la fuente Promax .....	23
Ilustración 16. Rizado con C=100uF.....	24
Ilustración 17. Distribución de las patillas del MCP3001 .....	24
Ilustración 18. Simulación para Vin=0 .....	25
Ilustración 19. Simulación para Vin=9.6 mV.....	26
Ilustración 20. Simulación para Vin=400 mV.....	26
Ilustración 21. Simulación para Vin= -400 mV .....	27
Ilustración 22. Prototipo en placa perforada .....	27
Ilustración 23. Esquemático completo en DS.....	29
Ilustración 24. Top copper.....	30
Ilustración 25. Bottom copper.....	30
Ilustración 26. Vista 3D Top Copper .....	31
Ilustración 27. Vista Real Top Copper.....	31
Ilustración 28. Vista 3D Bottom Copper .....	32

Ilustración 29. Vista real Bottom copper .....	32
Ilustración 30. Comunicación SPI .....	33
Ilustración 31. Conexión del CAD con Arduino .....	33
Ilustración 32. Comunicación SPI del MCP3001 .....	34
Ilustración 33. Conjunto completo .....	36
Ilustración 34. Variación de la sensibilidad con la temperatura .....	37
Ilustración 35. Esquemático completo .....	42

## Índice de tablas

Tabla 1. Resultados test.....	35
Tabla 2. Presupuesto .....	44

## 1. Introducción

Este proyecto surge por la necesidad de controlar el pH en un proceso de *Dip Coating*, una técnica de recubrimiento por inmersión controlada con precisión en un fluido, con el fin de depositar capas delgadas de un material sobre una superficie. En el resultado final intervienen muchos factores como el tiempo de inmersión, la velocidad de retirada o la temperatura, entre otros, y uno de ellos es el pH del fluido en el que se sumerge la muestra, por lo que conocerlo en tiempo real puede ayudar a mejorar la calidad del recubrimiento.

Es una técnica avanzada muy usada en investigación química y de nano materiales, y de la investigación en este campo es de donde nace, como spin-off de la Universidad Pública de Navarra, la empresa Nadetech Innovations S.L., que desarrolla equipos de laboratorio especializados, para la deposición de diversos micro-nano recubrimientos mediante diferentes técnicas. En uno de estos equipos es donde se pretende incorporar este proyecto, en concreto en un *ND-DC Dip Coater*.



Ilustración 1. NC-DC Dip Coater (Fuente: nadetech.com)

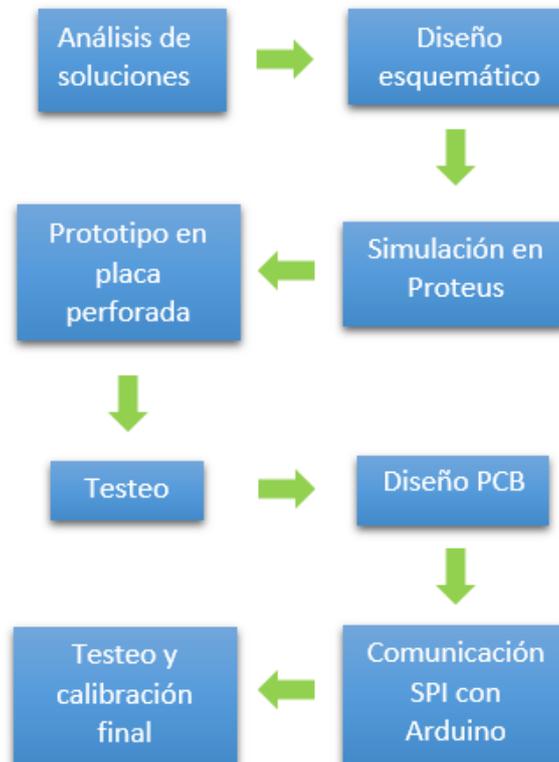
## 2. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo la adquisición y tratamiento de la señal analógica de una sonda de pH comercial para su procesamiento con un microcontrolador.

## 3. Alcance

Como todo proyecto electrónico, se llevará a cabo siguiendo unos pasos ordenados cronológicamente que nos llevaran a obtener un diseño final.

- Análisis previo para determinar las posibles soluciones a esta problemática.
- Diseño de un circuito electrónico capaz de acondicionar y amplificar la señal de medida al rango de trabajo del ADC de un microcontrolador.
- Montaje sobre una placa de circuito impreso del esquema diseñado.
- Testeo y calibración del sistema desarrollado.



## 4. Sensor

### 4.1. Que es el pH

El potencial de hidrogeno, comúnmente llamado pH, es una medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H<sup>+</sup>) presentes en una disolución. Se define como el logaritmo negativo de la concentración molar de los iones hidrógeno.

$$pH = -\log[H^+]$$

Es un factor muy importante porque determinados procesos químicos solo ocurren a un determinado pH.

En disolución acuosa, la escala de pH va de cero a catorce. El valor siete se denomina pH neutro, por debajo son valores ácidos y por encima de este son valores de pH básico.

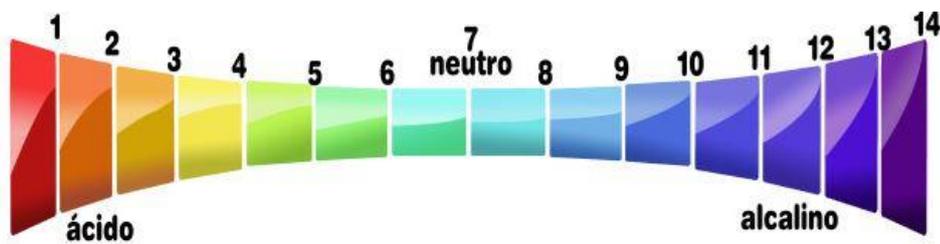


Ilustración 2. Escala de pH (Fuente: <http://blog.alkalinecare.com/2013/06/24/sabes-cuan-acido-estas-maneras-de-saberlo/>)

### 4.2. Sensores de pH

Los sensores de pH más usados son los electroquímicos, que transducen la actividad química del ion hidrogeno en una señal eléctrica. También existen sensores de tipo óptico pero son menos usados.

## MEDICIÓN DE PH

Los sensores electroquímicos se basan en la ecuación de Nernst, utilizada para calcular el potencial de reducción de un electrodo fuera de condiciones estándar.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q)$$

Donde:

- $E_0$  es el potencial en condiciones estándar.
- R la constante de los gases.
- T la temperatura absoluta.
- n los electrones intercambiados en la reacción.
- $\ln(Q)$  es el logaritmo neperiano del cociente de reacción.

Simplificado, lo que se hace es medir la diferencia de potencial entre un electrodo de referencia (pH conocido) y un electrodo de medición. Dependiendo de la construcción de estos electrodos se tienen diferentes tipos de medidores.

### 4.2.1. Electrodo de vidrio

Fabricados en un tubo de vidrio (cada vez más en materiales poliméricos para reducir la fragilidad) incorporan el electrodo de referencia y de medición en una misma sonda.

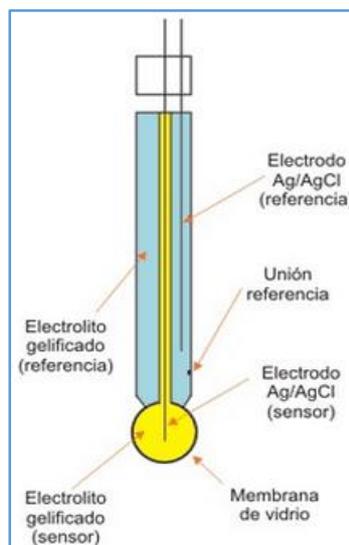


Ilustración 3. Sonda de vidrio (Fuente: <http://html.rincondelvago.com/analisis-de-suelo-y-aqua.html>)

## MEDICIÓN DE PH

Generalmente el electrodo de referencia es un hilo de plata recubierto de cloruro de plata (AgCl) sumergido en cloruro potásico (KCl) saturado de cloruro de plata.

El electrodo de medida es también un hilo de plata recubierto de cloruro de plata pero sumergido en HCl 0,1 y una membrana de vidrio sensible al pH.

### 4.2.2. ISFET

Los sensores de tipo ISFET (*Ion Sensitive Field Effect Transistor*) son electrodos de pH de material no vidrio basados en un transistor MOSFET.

El metal y el óxido de la puerta del MOSFET se sustituyen por una solución de muestra con un electrodo de referencia en dicha solución, y una capa de aislante apropiado para detectar una muestra específica.

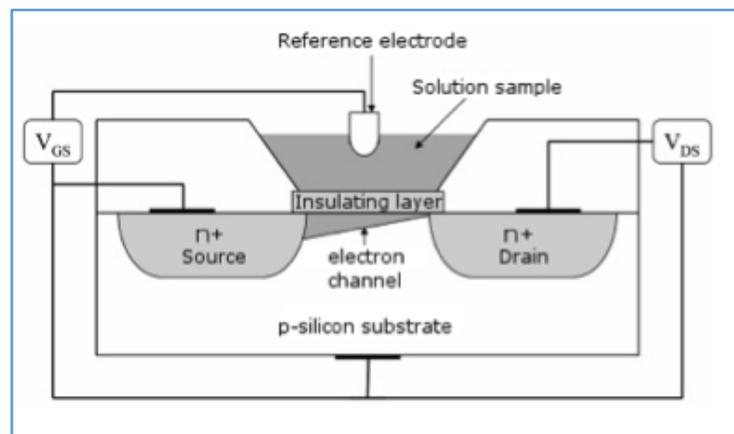


Ilustración 4. Esquemático del funcionamiento de un ISFET (Fuente: <http://lsi.epfl.ch/page-87745-en.html>)

Al estar fabricados con tecnología microelectrónica tiene ventajas sobre las sondas comunes de vidrio, como la robustez, el pequeño tamaño y el bajo coste.

MEDICIÓN DE PH

4.2.3. Electrodo usado

El electrodo que se usa y para el que se diseña el circuito es el modelo HI 1286 de Hanna Instruments.

Se trata de una sonda de vidrio con un electrodo de referencia de Ag/AgCl con salida en tensión. Para tener una idea del margen de salida del sensor, y así saber cómo adaptarla al margen de entrada del CAD, se obtiene su recta de trabajo teórica a partir de los datos del certificado de calidad del electrodo (Anexo 1).

La recta ideal se obtiene una vez compensado el *offset*, para el valor ideal de pH 4. La real se obtiene a partir de ambos valores sin compensar.

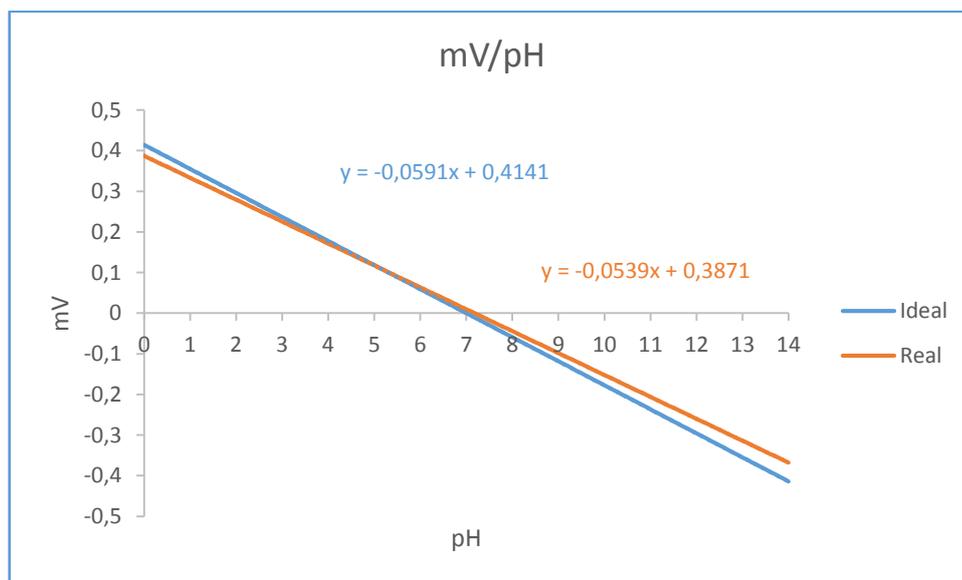


Ilustración 5. Sensibilidad del sensor.

El electrodo tiene una impedancia de salida de 50-150 MΩ por lo que el sistema de acondicionamiento tiene que tener una impedancia de entrada mucho mayor, para evitar que se produzcan grandes caídas de tensión en la línea.

Se observa que el rango de salida del sensor va a ser  $\pm 400$  mV aproximadamente. La sensibilidad real del sensor es 53.9 mV/pH.

Estos datos son medidas en condiciones estándar de temperatura (25 °C).

## 5. Desarrollo

El diseño final está basado en un modelo comercial al que se le han realizado una serie de modificaciones para adaptarlo a la sonda y especificaciones que se tienen.



Ilustración 6. pH meter V1.0 (<http://tienda.bricogeek.com/otros/581-sensor-analogico-de-ph.html>)

### 5.1. Análisis

En primer lugar se hace un análisis del esquemático para comprobar que se realizan las operaciones deseadas sobre la señal.

El tratamiento de la señal se hace en dos etapas. En la primera, la señal se filtra y amplifica. En la segunda, se invierte con ganancia unidad y se le suma un *offset* para que todo el rango de señal este en valores positivos y así poder leerlo con un conversor analógico-digital (CAD).

#### 5.1.1. Primera etapa

Se trata de una etapa de ganancia en configuración no inversora, combinada con un filtro paso bajo para eliminar ruidos provenientes del sensor.

MEDICIÓN DE PH

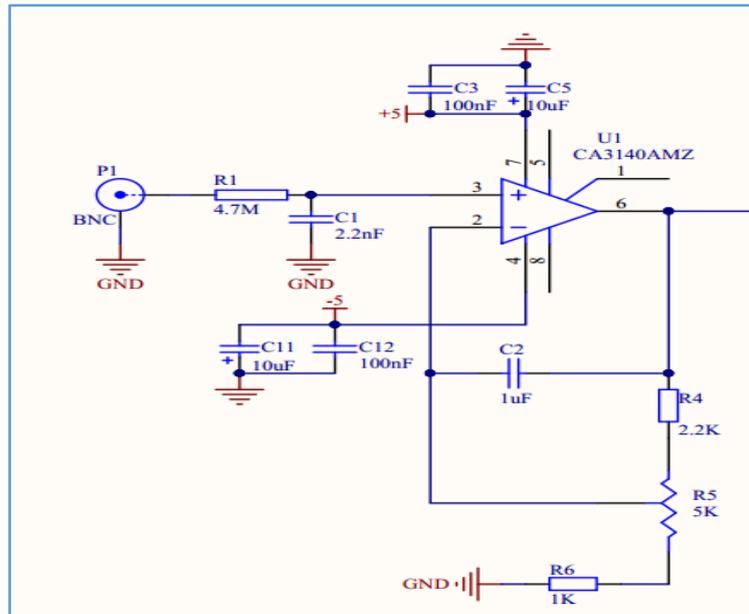


Ilustración 7. Primera etapa original  
(<http://www.dfrobot.com/image/data/SEN0161/pH%20meter%20V1.0%20SCH.pdf>)

Esta etapa tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{V_o - V_{in}}{R_4 + R_5x} = \frac{V_{in}}{R_6 + R_5(1 - x)} \rightarrow \frac{V_o}{R_4 + R_5x} = \frac{V_{in}}{R_6 + R_5(1 - x)} + \frac{V_{in}}{R_4 + R_5x}$$

$$V_o = V_{in} \left( 1 + \frac{2.2k + 5kx}{6k - 5kx} \right)$$

### 5.1.2. Segunda etapa

Esta etapa tiene una configuración más sencilla. Se trata de un inversor con ganancia unidad al que se añade una rama de *offset*.

MEDICIÓN DE PH

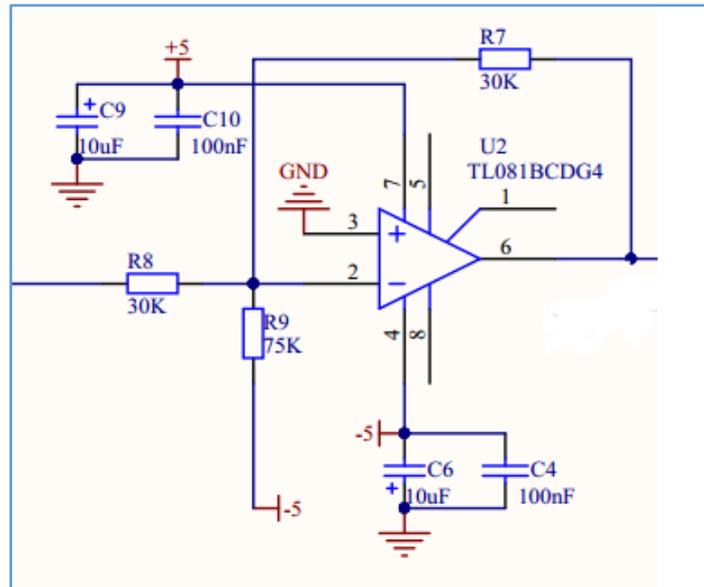


Ilustración 8. Segunda etapa original  
(<http://www.dfrobot.com/image/data/SEN0161/pH%20meter%20V1.0%20SCH.pdf>)

Esta etapa tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{V_{in}}{R8} = \frac{5}{R9} - \frac{V_o}{R7} \rightarrow V_o = 5 \frac{R7}{R9} - V_{in} \frac{R7}{R8}$$

$$V_o = 2 - V_{in}$$

Se puede observar que la rama de R9 introduce un *offset* de 2 V para hacer que todos los valores que tengamos a la salida sean positivos.

La inversión se realiza para que los valores de pH ácidos (0-7), que el sensor da valores de tensión positivos, sean los más bajos en la lectura del CAD. Si a la entrada de esta etapa se tiene un valor positivo, este se resta al *offset*, y si se tiene un valor negativo, se suma.

## 5.2. Modificaciones

### 5.2.1. Amplificador Operacional

La primera modificación que se realiza es el amplificador operacional. Se sustituyen ambos amplificadores por uno, que cumpliendo los requisitos, incluya los dos amplificadores en el mismo encapsulado y así se reduce el número de componentes.

El principal requisito es que tenga una impedancia de entrada elevada. Como ya se ha comentado anteriormente, esto hace que sumada a la resistencia de entrada de 4.7M, el sistema de acondicionamiento tenga una impedancia de entrada mucho más elevada que la impedancia del sensor y por tanto, las caídas de tensión en la línea de entrada serán lo más pequeñas posibles y la tensión de salida del sensor se reproduzca de forma fiel en la entrada del AO.

El rango de entrada del CAD será 0-5 V por lo que se tiene que conseguir que la salida de nuestro sistema de acondicionamiento de valores de salida en el mismo rango. Es decir, se tiene que aprovechar todo el rango de entrada del CAD. El AO lo alimentaremos a  $\pm 5$  V por lo que se busca uno que sea Rail-to-Rail para que sature muy cerca de la alimentación.

Los requisitos principales que hacen que el tratamiento de la señal sea lo más preciso posible son:

- Alta impedancia de entrada
- Rail-to-Rail.
- Bajo ruido
- Corriente de entrada baja.
- Tensión de *offset* baja.

Con estas características, el AO elegido es el TLC2272 de *Texas Instruments*, que cumple con las especificaciones requeridas y tiene un coste asequible.

MEDICIÓN DE PH

5.2.2. Compensación del *offset* del sensor

Para compensar el *offset* del sensor (pH 7) se incluye en la primera etapa una rama de compensación que hace que para este nivel de pH la salida sea 0 V, la tensión teórica a ese nivel de pH. Esta rama se compone de un potenciómetro conectado por un lado a 5 V y por el otro a masa, y la patilla central conectada a través de una resistencia elevada que limita la corriente, a la patilla inversora de la primera etapa.

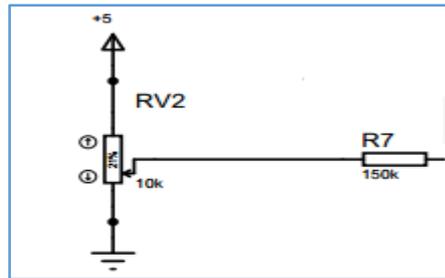


Ilustración 9. Rama de compensación de *offset*.

En este caso se usará  $R7 = 150k\Omega$ .

5.3. Cálculos teóricos.

Hechos estos cambios se plantean las ecuaciones de nuevo, de donde se obtendrá el valor de las resistencias imponiendo algunos requisitos.

Como se ha comentado anteriormente el rango de salida del sistema que se desea obtener es 0-5 V, y el rango de entrada al sistema es  $\pm 400$  mV por lo que la ganancia máxima del sistema podrá ser de 6.

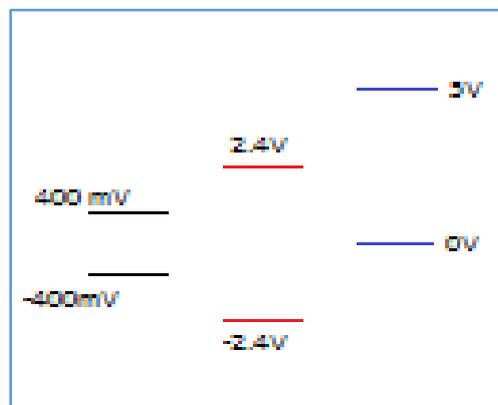


Ilustración 10. Rangos de tensión.

MEDICIÓN DE PH

5.3.1. Primera etapa

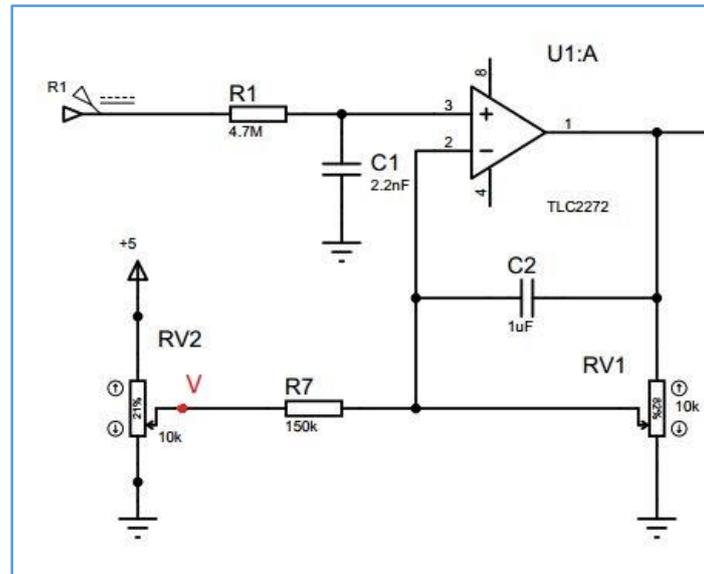


Ilustración 11. Primera etapa.

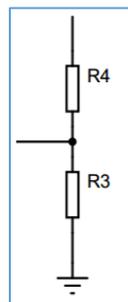
$$V = 5 \frac{R5}{10k} = \frac{R5}{2k}$$

$$\frac{V - Vin}{R7} + \frac{Vo - Vin}{R4} = \frac{Vin}{R3} \rightarrow Vo = Vin \left( 1 + \frac{R4}{R3} + \frac{R4}{150k} \right) - \frac{R5 * R4}{2k * 150k}$$

Condiciones:

1. R3 y R4 forman el potenciómetro RV1 de 10kΩ

$$R3 = 10k - R4$$



MEDICIÓN DE PH

2. Para compensar el *offset*, cuando la entrada sea 9.6 mV, la salida tiene que ser 0 V.

$$0.0096 \left( 1 + \frac{R4}{10k - R4} + \frac{R4}{150k} \right) = \frac{R5 * R4}{2k * 150k}$$

3. La ganancia máxima tiene que ser 6.

$$\left( 1 + \frac{R4}{10k - R4} + \frac{R4}{150k} \right) = 6$$

De la tercera condición se obtiene:

$$R4 = 8317 \Omega \rightarrow R4 = 8.3 k\Omega$$

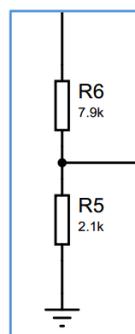
Por lo tanto:

$$R3 = 1.7 k\Omega$$

De la segunda:

$$R5 = 2.06 k\Omega \rightarrow R5 = 2.1 k\Omega$$

Esta resistencia es la parte que va a masa del potenciómetro RV2



MEDICIÓN DE PH

Los valores de ajuste de los potenciómetros calculados son teóricos, y se ajustaran con más precisión con la calibración del sistema.

La función de transferencia queda:

$$V_o = V_{in} \left( 1 + \frac{8.3k}{1.7k} + \frac{8.3k}{150k} \right) - \frac{2.1k * 8.3k}{2k * 150k}$$

$$V_o = 5.937V_{in} - 0.0581$$

5.3.2. Segunda etapa

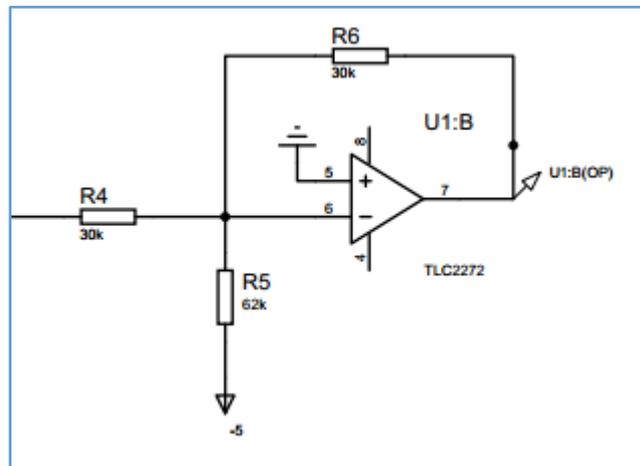


Ilustración 12. Segunda etapa.

$$V_{o2} = 5 \frac{R_6}{R_5} - V_{o1}$$

Esta etapa tiene ganancia unitaria por lo que R6 y R4 son iguales y en este caso de 30 kΩ.

El nivel de *offset* es de 2.4 V por lo que:

$$5 \frac{R_6}{R_5} = 2.4 \rightarrow \frac{5}{2.4} R_6 = R_5 \rightarrow R_5 = 62.5 \text{ k}\Omega$$

MEDICIÓN DE PH

Se usa una resistencia normalizada de 62 kΩ por lo que el *offset* real es:

$$4.871 \frac{30k}{62k} = 2.356 V$$

(Se pone 4.871 porque el inversor no da exactamente -5 V, sino que se produce una pequeña caída)

La función de transferencia queda:

$$V_o = 2.356 - V_{in}$$

Por lo tanto la función de transferencia total del sistema es:

$$V_o = 2.356 - (5.937V_{in} - 0.0581)$$

#### 5.4. Inversor

Para conseguir la tensión negativa que se usa para alimentar el amplificador operacional y como referencia en la segunda etapa se utiliza un *Charge Pump Voltage Converter*. Es un convertidor DC-DC de capacidades conmutadas que permite invertir la tensión que se tiene en la entrada del integrado.

En concreto se usa un TC1044SEPA de Microchip.

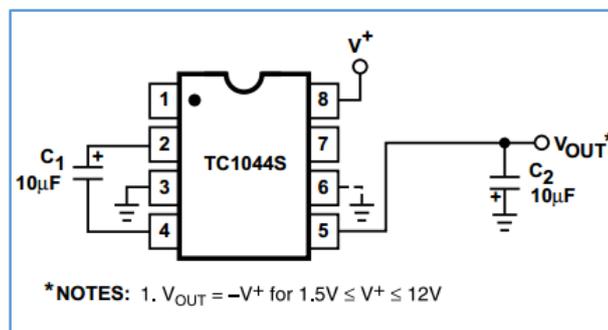


Ilustración 13. TC1044 como Inversor simple (Fuente: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21348a.pdf>)

MEDICIÓN DE PH

Al ser de capacidades conmutadas produce a la salida un rizado de tensión de unos 20 mV de amplitud. Este rizado no compromete la alimentación del operacional pero sí que puede ser notable en la referencia de tensión de la segunda etapa.

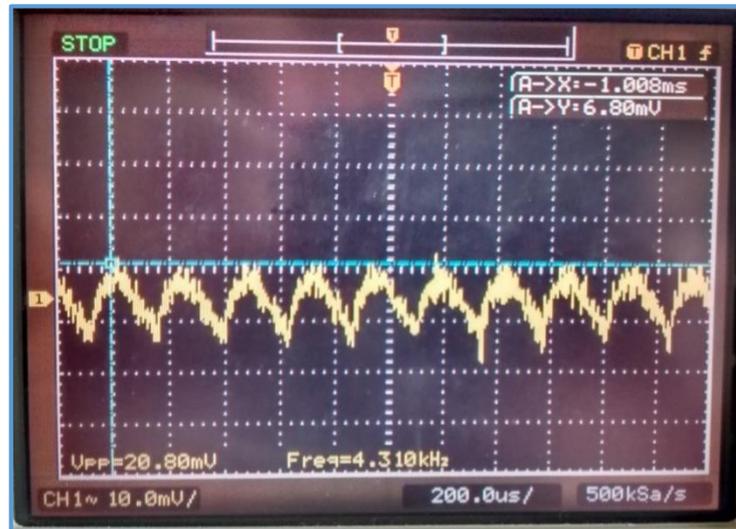


Ilustración 14. Rizado en Vout.

Para reducir este rizado se aumenta la capacidad del condensador en la salida. Se prueba con distintas capacidades hasta que la amplitud sea similar a cuando se alimenta desde la fuente Promax. Se toma una capacidad de 100 uF, con la que el rizado se reduce a unos 4 mV de amplitud.

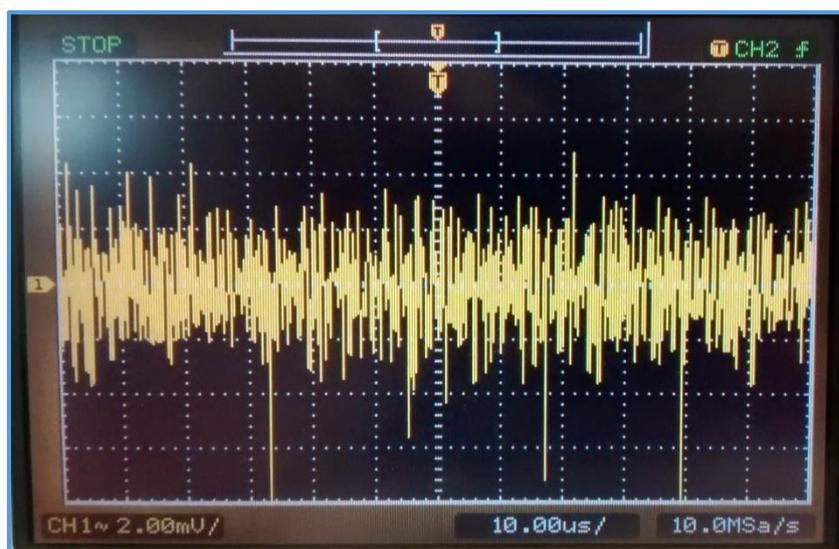


Ilustración 15. Ruido alimentado desde la fuente Promax.

MEDICIÓN DE PH

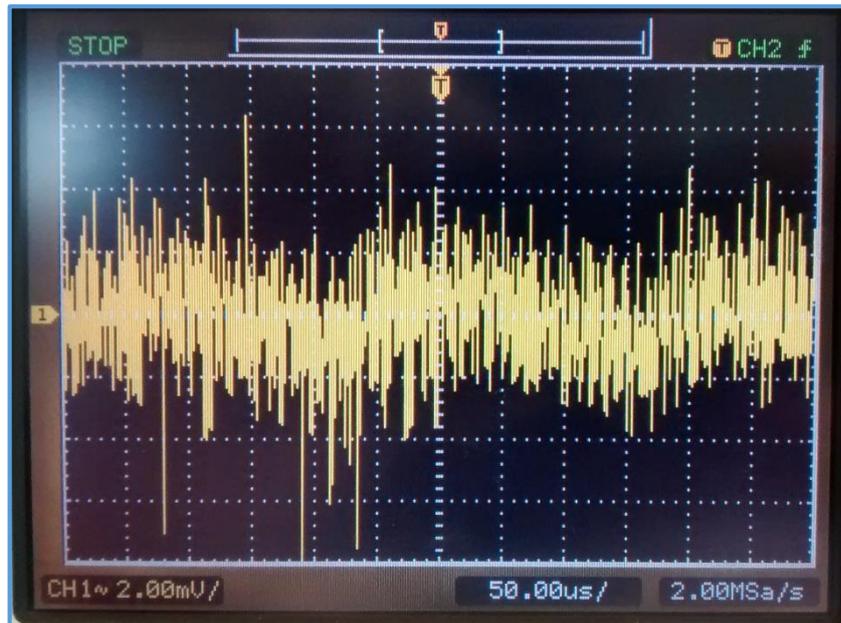


Ilustración 16. Rizado con  $C=100\mu F$ .

### 5.5. Convertidor Analógico Digital

Se implementa también en la misma placa el CAD. Para su elección se precisan tres requisitos:

- Un canal
- Comunicación SPI
- Entrada en tensión

Se usará un MCP3001 de *Microchip*, un CAD de aproximaciones sucesivas de 10 bits de resolución

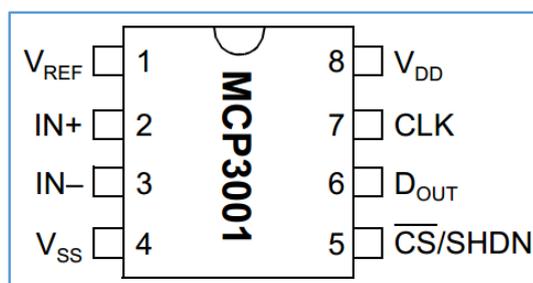


Ilustración 17. Distribución de las patillas del MCP3001 (Fuente: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21293C.pdf>)

## MEDICIÓN DE PH

La sensibilidad es:

$$LSB = \frac{5}{1024} = 4.88 \text{ mV}$$

La entrada es en tensión única por lo que la patilla IN- se pone a masa.  $V_{REF}$  se conecta a +5 V para tener un rango de entrada de 0-5 V.

El valor digital a la salida se calcula como:

$$\text{Digital Output Code} = \frac{1024 * V_{in}}{5}$$

### 5.6. Simulaciones

Antes de montar un primer prototipo se pasa el diseño a un programa de simulación electrónica, en este caso Proteus.

Primero se simula con  $V_{in}=0$  para ver si está bien ajustada la compensación del *offset* del sensor (-0.0581 según los cálculos teóricos).

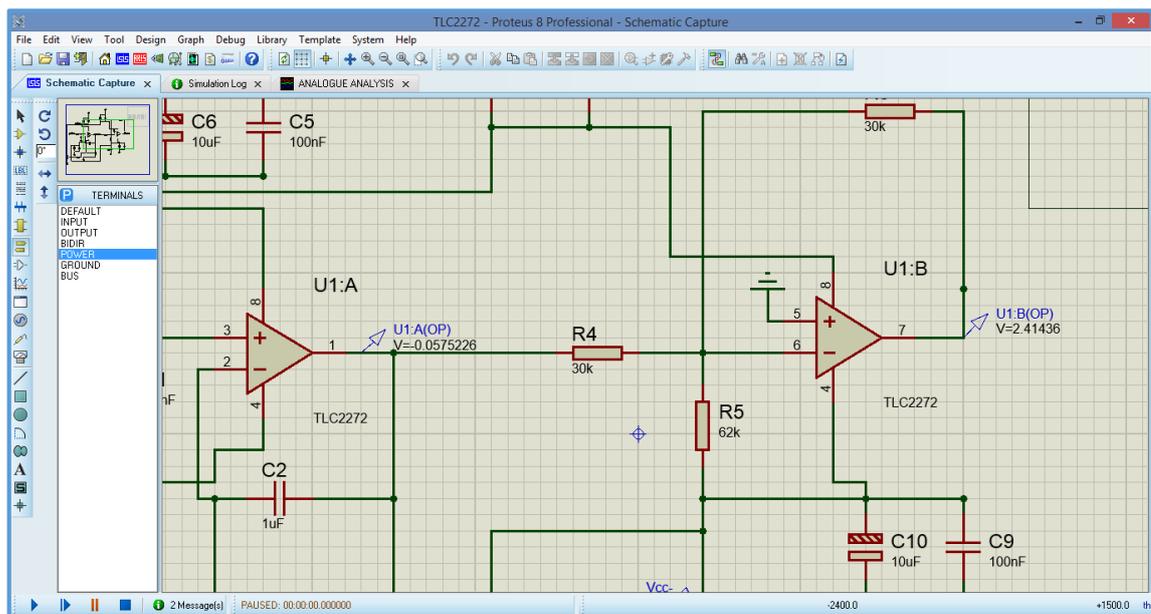


Ilustración 18. Simulación para  $V_{in}=0$ .

MEDICIÓN DE PH

Se observa en la imagen que el valor de la simulación (-0.0575) es muy parecido al calculado teóricamente.

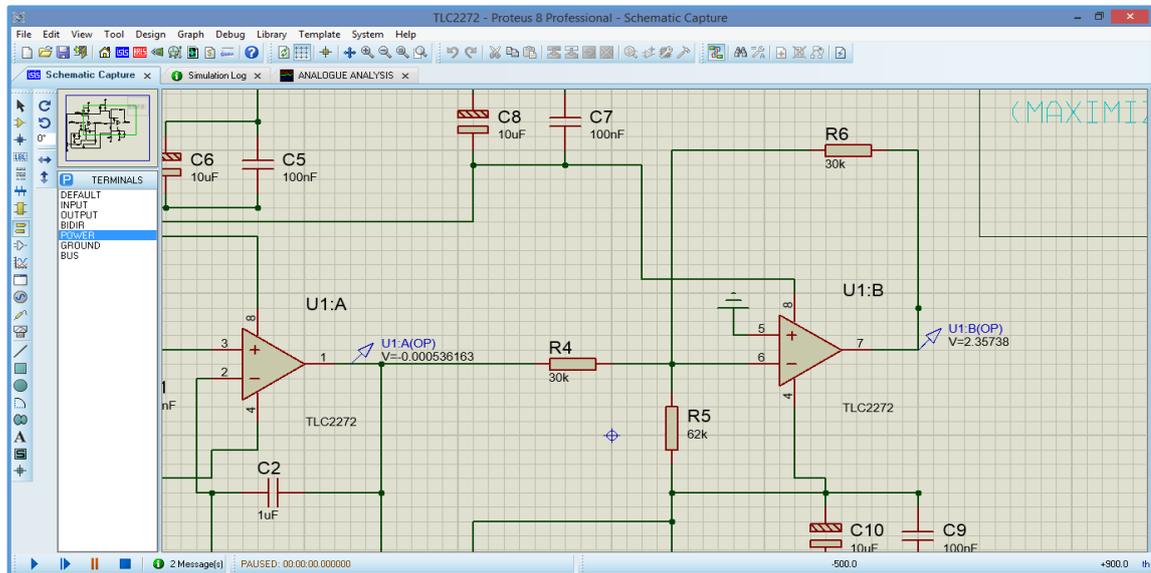


Ilustración 19. Simulación para  $V_{in}=9.6\text{ mV}$

Con una entrada de 9.6 mV (*offset* del sensor) se observa que la salida se puede considerar cero (0.5 mV) y que el *offset* introducido en la segunda etapa es el que se ha calculado teóricamente (2.357 V).

Se simulan también los valores extremos del rango ( $\pm 400\text{ mV}$ )

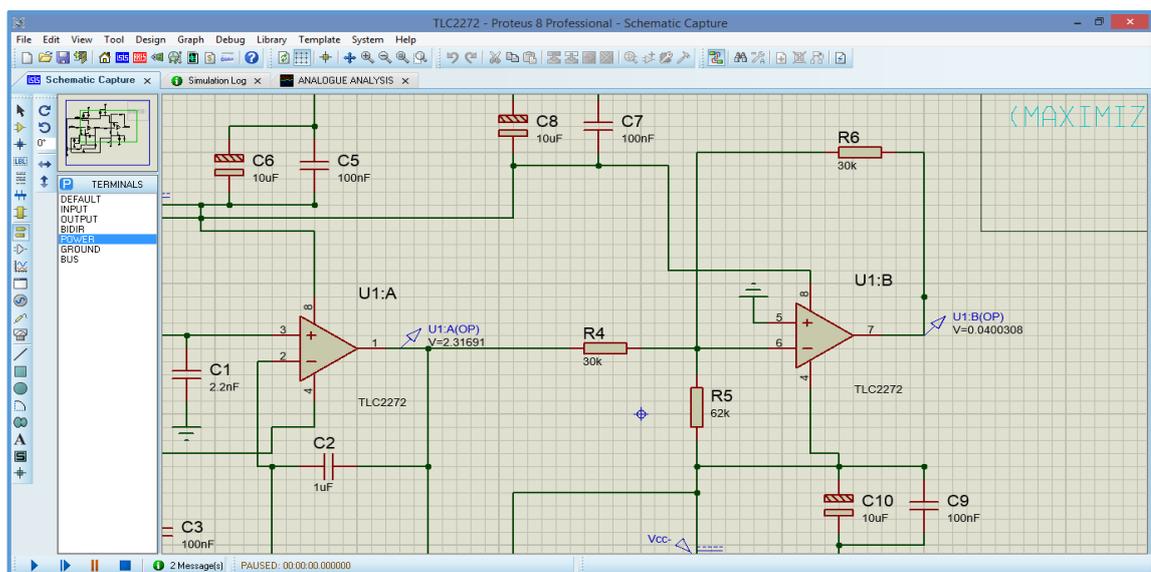


Ilustración 20. Simulación para  $V_{in}=400\text{ mV}$

## MEDICIÓN DE PH

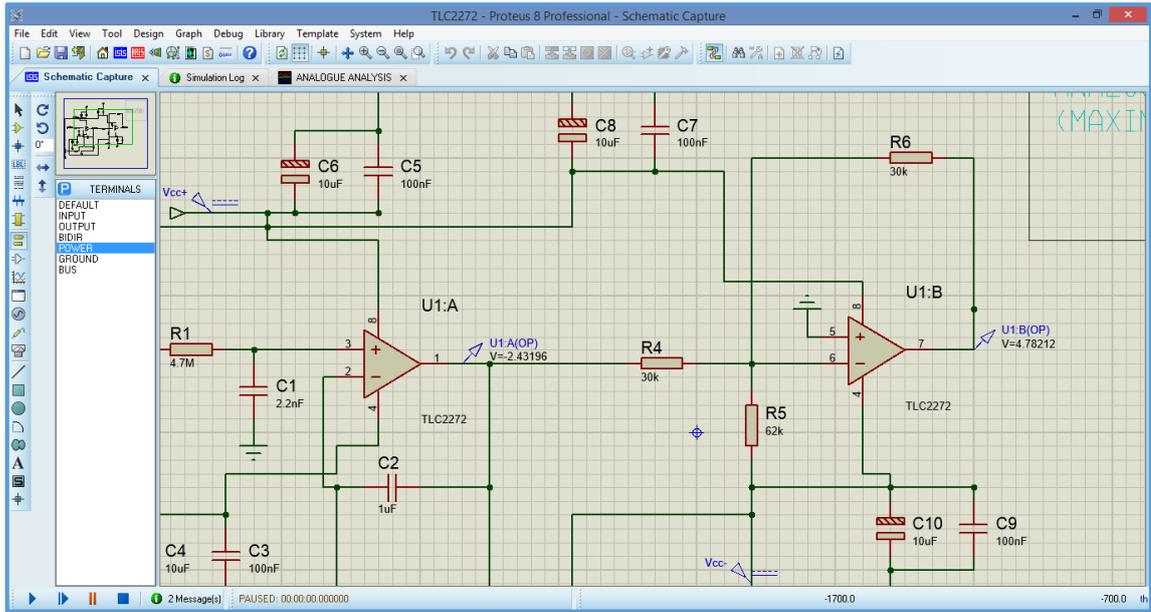


Ilustración 21. Simulación para  $V_{in} = -400 \text{ mV}$

Se ve que las ecuaciones que se han planteado se cumplen de manera correcta.

Se trata de una simulación por lo que en la realidad estos valores no son tan precisos, pero da una idea del funcionamiento.

### 5.7. Montaje en placa perforada

Una vez terminado el diseño del esquemático y después de simularlo en Proteus, se hace un prototipo en una placa perforada para comprobar que en la realidad todo funciona de forma correcta.

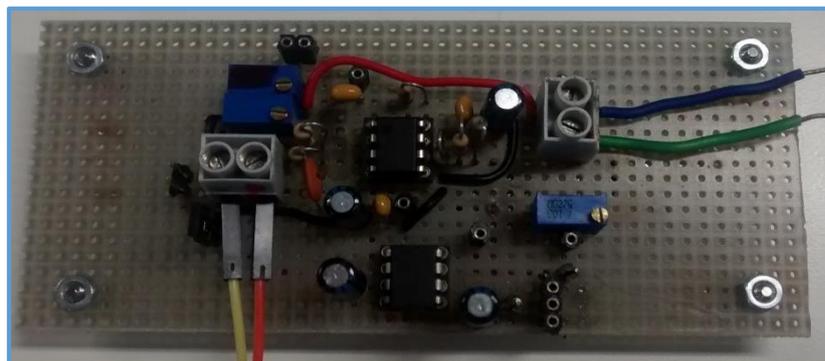
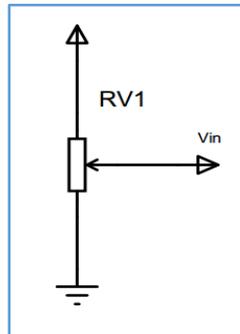


Ilustración 22. Prototipo en placa perforada.

## MEDICIÓN DE PH

Se empieza a testear el diseño introduciendo las tensiones de entrada desde una fuente y variando con un potenciómetro, así se consigue probar todo el rango de tensiones.



Después se conecta el sensor y se prueba para pH 4 y 7 comprobando que los valores de tensión que se obtienen son relativamente correctos. Este tipo de prototipos no son muy precisos ya que introducen muchos ruidos, por eso se usa para comprobar el funcionamiento sin requerir mucha precisión.

### 5.8. PCB

El objetivo final del proyecto es el montaje del esquema diseñado en una placa de circuito impreso (PCB), por lo tanto después de testear el circuito en la placa perforada se procede a diseñar esta placa.

El PCB se realizó con el software de diseño electrónico *Design Spark* perteneciente a la empresa *RS Components*. Se eligió este software porque se había trabajado anteriormente con él en la asignatura de Fabricación y Ensayo de Equipos Electrónicos y porque al pertenecer a un distribuidor de componentes electrónicos facilita añadir los componentes comerciales al diseño.

La tensión de alimentación se ha obtenido hasta ahora de una fuente de alimentación Promax del laboratorio. En el diseño del PCB se ha incluido una etapa de alimentación con un regulador de tensión (L7805) que proporciona los 5 V necesarios y un jack para conectar un cargador convencional para poder hacer pruebas sin depender de la fuente del laboratorio.

## MEDICIÓN DE PH

También se han añadido *jumpers* de comprobación en puntos clave como la salida del sensor o las salidas de los dos operacionales, para medir con facilidad.

El primer paso para el diseño del PCB es dibujar el esquemático en el software.

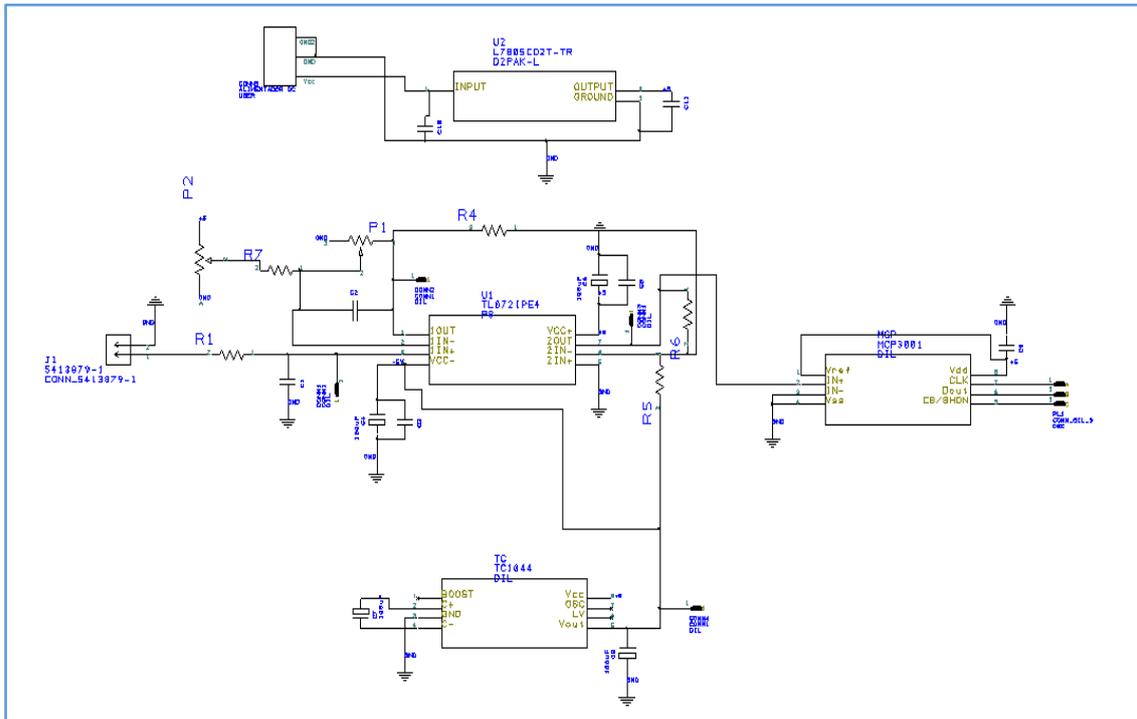


Ilustración 23. Esquemático completo en Desing Sparks.

Posteriormente se vuelca el contenido al PCB y se distribuyen los componentes de la manera más adecuada teniendo en cuenta algunos aspectos.

- Disposición de los componentes: se ha tratado de “separar” la parte de potencia o alimentación y la de señal. De esta manera los componentes de potencia se han situado en la parte de debajo de la placa, y los de señal en la de arriba para tratar de evitar interferencias.
- Tamaño de las pistas: se ha tratado de hacer las pistas lo más cortas y anchas posible, así se reduce la caída de tensión en ella y la transmisión de la señal es más adecuada.

MEDICIÓN DE PH

- Tamaño: el tamaño de la placa es el menor posible con el fin de ahorrar material y en el caso de que se llevase a producción, reducir el coste.
- Otros: Se ha realizado tanto plano de masa como plano de alimentación (+5 V). Se han eliminado islas de estos planos para evitar interferencias.

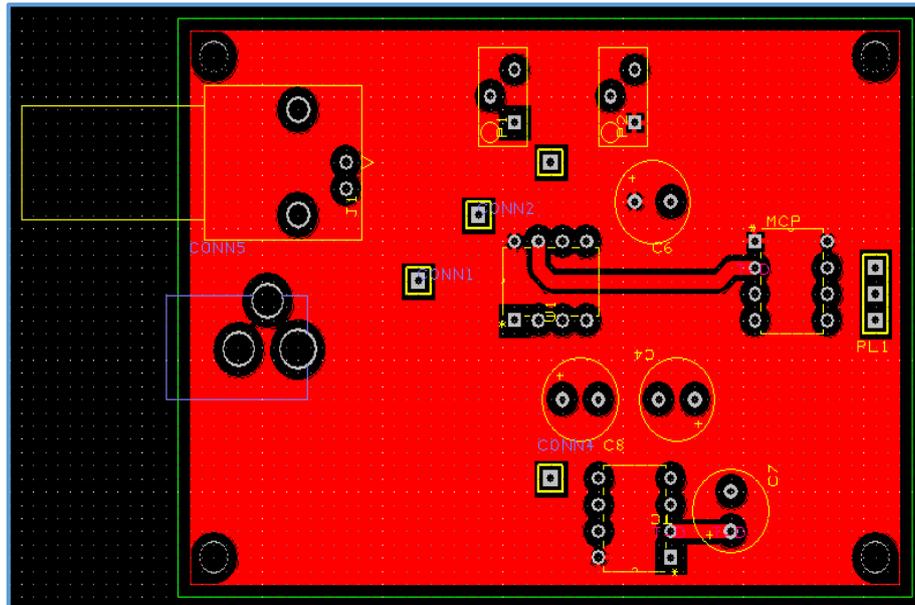


Ilustración 24. Top copper.

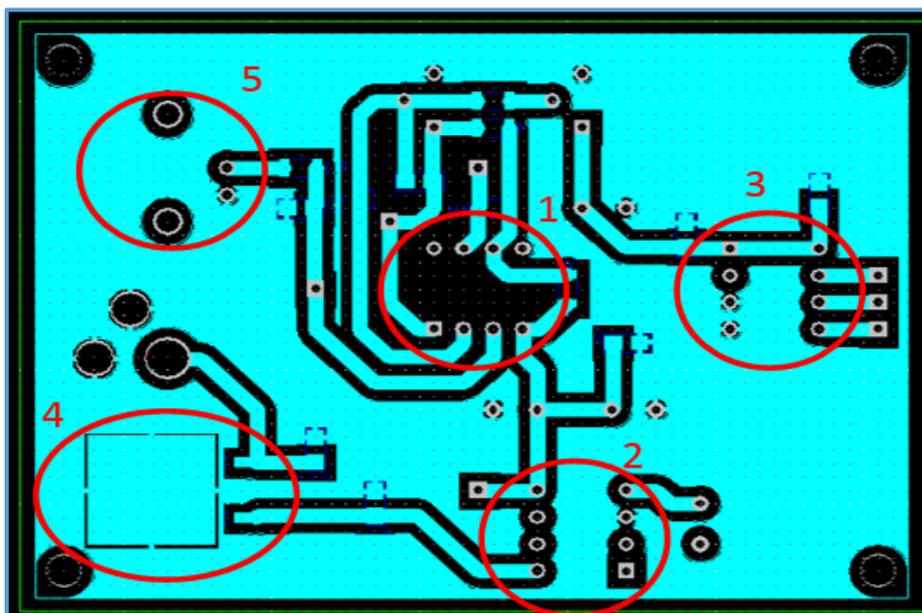
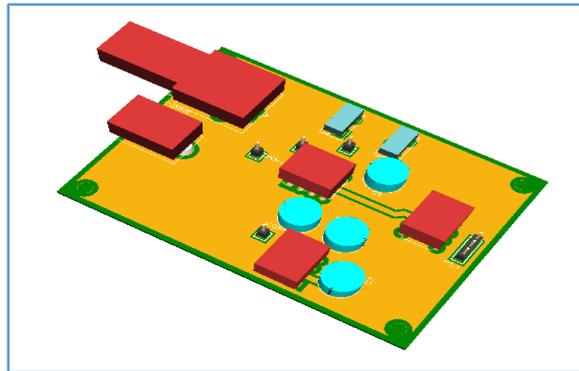


Ilustración 25. Bottom copper.

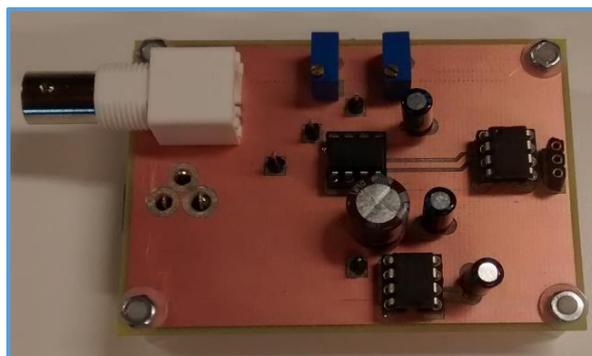
MEDICIÓN DE PH

1. Amplificador Operacional (TLC2272).
2. Inversor (TC1044).
3. CAD (MCP3001).
4. Regulador lineal (L7805).
5. Conector BNC.

En lugar de soldar los integrados directamente se han colocado zócalos para quitar los integrados con facilidad si existiera algún problema.



*Ilustración 26. Vista 3D Top Copper.*



*Ilustración 27. Vista Real Top Copper.*

## MEDICIÓN DE PH

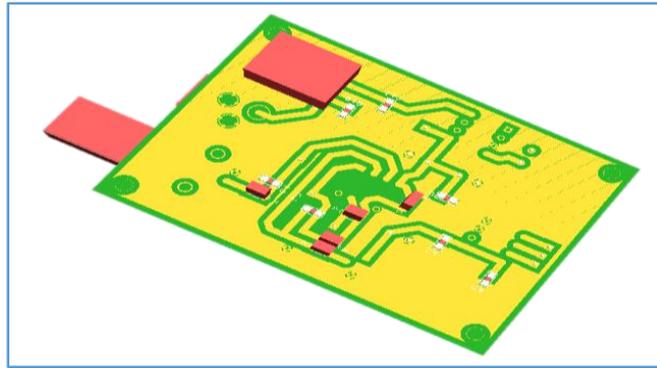


Ilustración 28. Vista 3D Bottom Copper.

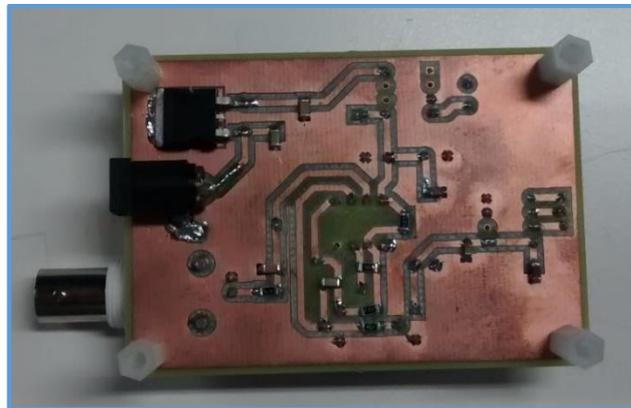


Ilustración 29. Vista real Bottom copper.

### 5.9. Comunicación SPI

El bus SPI (*Serial Peripheral Interface*) es un bus de comunicación serie síncrono. Es un bus *full-duplex* por lo que la transferencia de datos se puede realizar en ambos sentidos al mismo tiempo.

Para permitir la comunicación síncrona se utiliza un sistema de cuatro cables.

- MISO (*Master Input Slave Output*): señal de entrada al dispositivo maestro.
- MOSI (*Master Output Slave Input*): transmisión hacia el dispositivo esclavo.
- SCLK o SCK: señal de reloj del bus. Rige la velocidad de transmisión de los datos.

MEDICIÓN DE PH

- SS o CS (*Slave Select* o *Chip Select*): habilita el integrado hacia el que se envían los datos.

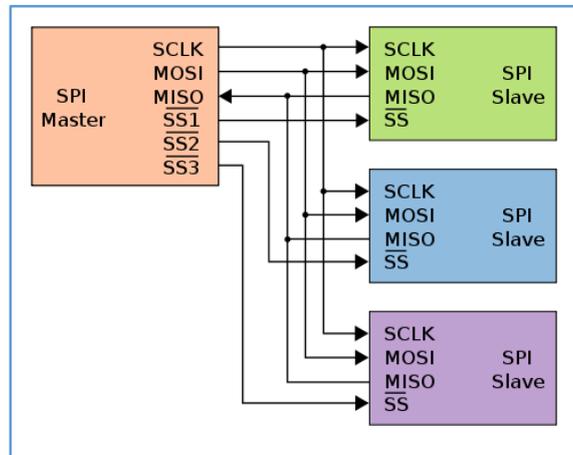


Ilustración 30. Comunicación SPI (Fuente: Wikipedia.com)

En la comunicación se utiliza como *Master* un Arduino Uno, y a través de su monitor serie, se visualizan los valores.

La conexión del CAD con Arduino es la siguiente:

- Pin 13: SCLK
- Pin 12: MISO
- Pin 10: SS

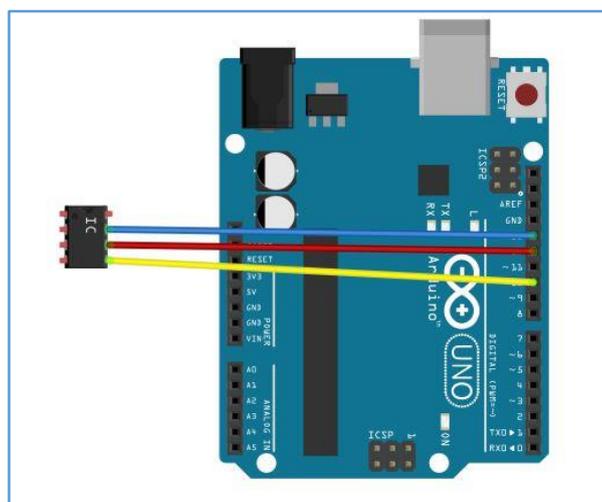


Ilustración 31. Conexión del CAD con Arduino.

MEDICIÓN DE PH

La comunicación del CAD es de la forma:

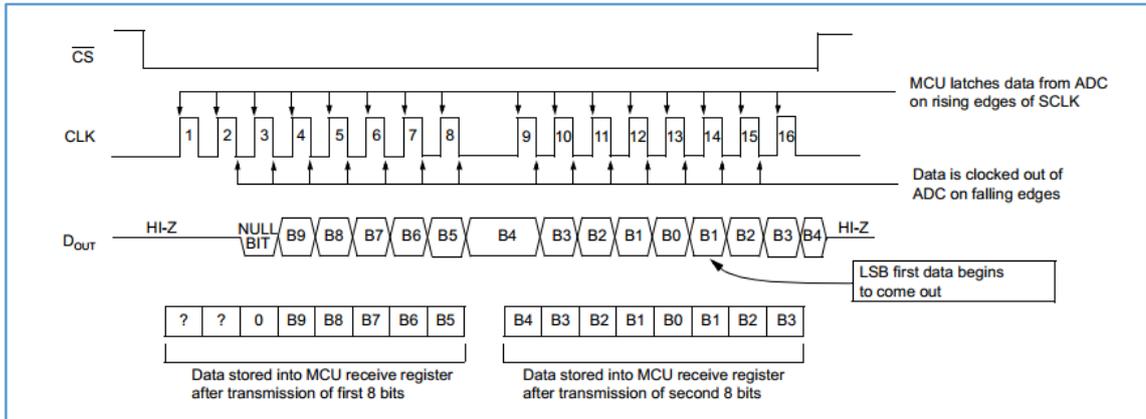


Ilustración 32. Comunicación SPI del MCP3001 (Fuente: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21293C.pdf>)

La información se envía en dos bytes. En el primer byte se envían dos bits desconocidos, un bit nulo y los cinco primeros bits de mayor orden. En el segundo byte los cinco bits restantes y por último los bits B1-B3 de nuevo.

Las operaciones de código a realizar son sencillas y se explican en el Anexo 4 junto con el código. En resumen, cuando se reciben los bytes, se juntan en una palabra de 16 bits y esta se corre 3 bits hacia la izquierda para eliminar los 3 bits repetidos.

### 5.10. Resultados finales

Las pruebas finales se realizan para cinco valores de pH (2,4, 7, 9,11). En primer lugar se calibra para pH 7 y pH 4. Teóricamente bastaría con estos dos puntos ya que el comportamiento es lineal, pero se testean el resto de valores para tener un rango de prueba más amplio.

Para calibrar, en primer lugar se coloca la sonda en una solución buffer de pH7, y se mueve el potenciómetro de *offset* hasta que tengamos el valor 7.

Después se coloca en una solución buffer de pH4 y se mueve el potenciómetro de ganancia hasta que tengamos el valor 4.

MEDICIÓN DE PH

Se puede repetir este paso una vez más para conseguir un mejor ajuste. Después de introducir la sonda en una solución buffer y antes de introducirla en otra, se debe limpiar la sonda con agua destilada, para no contaminar las muestras (En ningún caso con papel).

Una vez calibrado, la función de transferencia puede haber variado respecto de la teórica calculada anteriormente. En este caso, después de calibrar la primera vez *offset*, la ecuación que nos queda es:

$$V_o = 2.356 - (5.937V_{in} - 0.02271)$$

Con esta ecuación se calculan los valores teóricos.

Tabla 1. Resultados test.

pH	V teórico (V)	V real (V)	DOC	pH en pantalla	Error valor pH
2	0,721	0,755	156	2,13	0.13
4	1,361	1,361	283	4,06	0.0
7	2,322	2,337	486	7,15	0.15
9	2,962	2,881	600	8,9	0.1
11	3,603	3,431	718	10,7	0.3

Se observa que los valores obtenidos son muy similares a los teóricos. Realmente, lo importante no es que se parezca el valor de tensión real al teórico sino que el valor de pH en pantalla sea el que estamos midiendo. Volviendo a calibrar se mejorarían los resultados, pero como prueba de que funciona correctamente es suficiente.

MEDICIÓN DE PH

El valor de pH en pantalla se obtiene de la siguiente manera.

1. Del valor digital, se obtiene la tensión que lee el CAD.

$$V = \frac{\text{Digital} * 5}{1024}$$

2. Se obtiene una función de transferencia que relacione esa tensión con el pH, combinando la función de transferencia del sistema con la ecuación de sensibilidad del sensor.

$$V = 2.356 - (5.937(-0.0539 * pH + 0.3871) - 0.02271)$$

$$pH = \frac{V - 0.08041}{0.3202}$$



*Ilustración 33. Conjunto completo.*

## 6. Posibles mejoras

### 6.1. ISFET

Como se ha comentado anteriormente existen sondas electroquímicas diferentes a la que se ha usado que se basan en un MOSFET.

Al no estar fabricadas en vidrio, este tipo de sondas son más robustas. Además se guardan en seco por lo que las necesidades de mantenimiento son menores que en las sondas de vidrio, que necesitan guardarse en húmedo. Este aspecto hace que sean atractivas para el montaje en un equipo de laboratorio.

El punto desfavorable es que es una tecnología relativamente nueva, con muchas investigaciones pero que no está muy desarrollada a nivel comercial por lo que se descartó el uso de este tipo de sondas.

Por ser el fundamento electroquímico, la salida de tensión que da es similar a la sonda de vidrio que hemos usado y se podría adaptar de manera sencilla al diseño que hemos realizado.

### 6.2. Compensación de temperatura

La medición del pH se ve afectada por la temperatura del fluido, que hace que la pendiente de la recta mV/pH cambie.

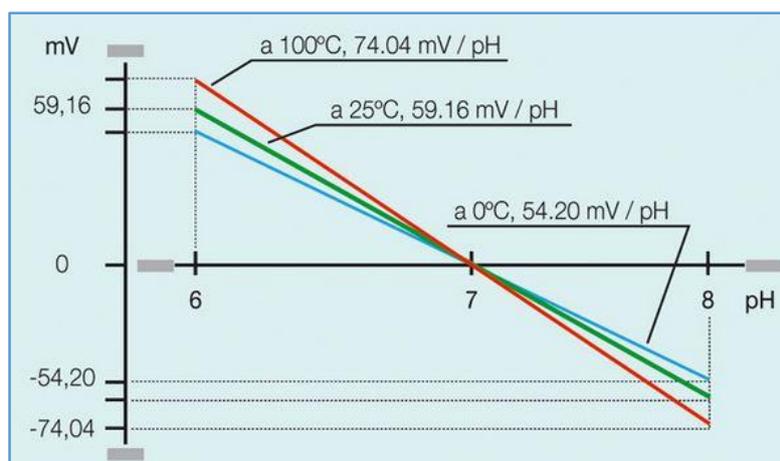


Ilustración 34. Variación de la sensibilidad con la temperatura (Fuente: <http://www.crisoninstruments.com/index.php?module=11&seccio=34&lang=es>)

## MEDICIÓN DE PH

Los medidores de pH comerciales suelen compensar la temperatura de manera automática, incluyendo habitualmente una Pt100 o integrando el sensor de temperatura en la propia sonda, por ejemplo

Por simplicidad se decidió no incluir la compensación por temperatura en este proyecto.

### 7. Líneas futuras

Como objetivo final se pretende incorporar esta aplicación a un equipo de laboratorio, por ello este diseño se deberá adaptar para su incorporación.

Este diseño está pensado para funcionar de manera autónoma e independiente, por lo que el PCB existente en el equipo se podría rediseñar para incorporar esta nueva aplicación y así facilitar la integración en el equipo.

En este caso la compensación del offset se hace por hardware pero también sería posible hacerla de manera software.

Tratándose de un equipo avanzado puede ser importante incluir la compensación de temperatura para obtener mayor precisión en las medidas. Esto se puede hacer incluyendo una sonda de temperatura discreta (Pt 100 o similar), o bien con una sonda de pH que incluya sensor de temperatura (por ejemplo el modelo HI1610 de Hanna Instruments). En este aspecto habría que valorar la mejor solución en cuanto a costes, precisión, y cambios a realizar en el diseño para incorporar la compensación por temperatura.

## 8. Conclusiones

La realización de este proyecto ha supuesto una manera interesante de poner en práctica todos los conceptos aprendidos sobre la fabricación de equipos electrónicos, además de acercarnos a la realidad de este campo, ya que abarca todas las etapas de la fabricación de un equipo. Desde la idea, hasta el prototipo final, pasando por la selección de componentes, diseño esquemático, simulaciones, prototipos primarios, etc.

Un proyecto de estas características permite ampliar los conocimientos más prácticos, conocer problemas habituales que surgen en el diseño electrónico, ampliar el conocimiento de componentes existentes en el mercado, de las posibilidades que estos permiten, y agilidad a la hora de manejar las hojas de características. En definitiva, ampliar la visión y aprender a hacer electrónica, algo que solo se aprende haciendo electrónica.

En el ámbito personal, realizar este proyecto para Nadetech ha supuesto una experiencia satisfactoria por trabajar para una empresa puntera en el sector tecnológico y de ingeniería, además de saber que tu trabajo no se queda en un cajón como un simple proyecto, sino que tiene una utilidad real. Por otro lado, que sea una empresa creada por alumnos de la universidad aporta una motivación extra para seguir aprendiendo y trabajando.

## 9. Bibliografía

### 9.1. Sistema original

<http://tienda.bricogeek.com/otros/581-sensor-analogico-de-ph.html>

### 9.2. Información general

<http://blog.alkalinecare.com/2013/06/24/sabes-cuan-acido-estas-maneras-de-saberlo/>

<http://lsi.epfl.ch/page-87745-en.html>

<http://nadetech.com/index.php/es/>

Apuntes de la asignatura *Fabricación y Ensayo de Equipos Electrónicos*, Universidad Pública de Navarra, Jesús María Corrés Sanz.

Apuntes de la asignatura *Instrumentación*, Universidad Pública de Navarra, Javier Goicoechea Fernández.

Douglas A. Skoog/James J. Leary, *Análisis Instrumental*, 4ª Ed. McGraw Hill.

### 9.3. Hojas de características

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21293C.pdf>

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21348a.pdf>

<http://www.ti.com/lit/ds/slos190g/slos190g.pdf>

### 9.4. Comunicación SPI

<http://www.electroensaimada.com/spi.html>

<http://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>

MEDICIÓN DE PH

10. Anexos

10.1. Anexo 1.Hoja de características HI 1286



## Electrode Quality Certificate

Electrode: HI 128G	Parameter: pH	SN: 0203006N	Recommended for: HI 081402
-----------------------	------------------	-----------------	-------------------------------

Description: Plastic body,double junction,combination pH electrode

*Hanna Instruments certifies that this electrode has been produced, calibrated and tested to meet all applicable Hanna procedures, using standards and reference instruments, the accuracy of which is traceable to the National Institute of Standards (NIST) in the USA or to internationally acceptable national physical standards. The standards and reference instruments used in calibration and testing are supported by a calibration system which meets requirements of ISO9001.*

Standard Reference Materials:	pH:	185h, 186g, 187e, 189c, 191d, 2193a [NIST]
External/Internal reference devices*:	KΩ/MΩ:	SN#148047ADH [Megohmmeter]

Tests performed using reference devices:

mV (@ 25 °C):	Offset (7.01 pH) [mV]:	0.0	
	Tolerance [mV]:	± 10	
	Reading [mV]:	9.6	<b>PASSED</b>
	Slope (4.01 pH) [mV]:	177.5	
	Tolerance [mV]:	170.4 - 177.5	
	Reading [mV]**:	171.4	<b>PASSED</b>
mV response time	Standard time [s]:	< 1	<b>PASSED</b>
(4.01 pH - 7.01 pH)***:	Tolerance [s]:	+ 1	
Class impedance (@ 25 °C):	Tolerance [MΩ]:	50 - 150	<b>PASSED</b>
Reference impedance (@ 25 °C):	Maximum value [KΩ]:	10	<b>PASSED</b>

\*) All references are periodically checked and are used only if are inside certification interval.  
\*\*) Offset compensated.  
\*\*\*) Evaluated for 90 % of step.

Quality control and testing criteria have been met.

Date: <u>2015-01-14</u>	Inspector: <u>Cimpean Vasile / Engineer</u> <small>(Name / Title of Signatory)</small>
	Signature: _____ 

CERTELECT\_pH\_1286\_rev.0.0.1
page 1 of 1

Hanna Instruments Inc. 584 Park East Drive Woonsocket, RI 02895  
[www.hannainst.com](http://www.hannainst.com)

MEDICIÓN DE PH

10.2. Anexo 3. Esquemático

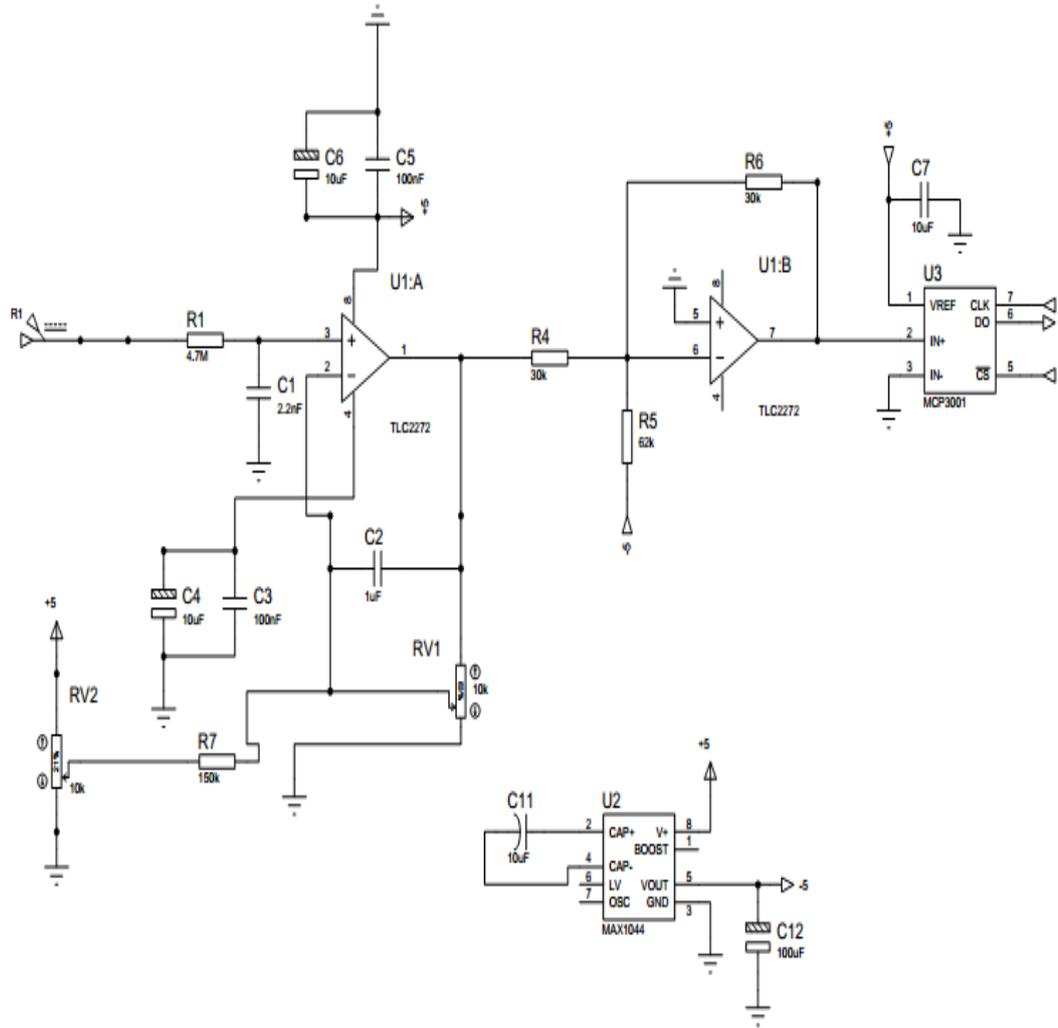


Ilustración 35. Esquemático completo.

### 10.3. Anexo 4. Código de Arduino

```
#include <SPI.h>
const int ss = 10;
word res;

void setup() {
  Serial.begin(9600); //iniciamos el monitor serie
  pinMode (ss, OUTPUT); //configuramos el pin ss como salida
  SPI.begin(); //iniciamos comunicacion SPI
}
void loop() {
  digitalWrite(ss, LOW); //habilitamos el ADC
  byte res1 = SPI.transfer (0x00); //recibimos el primer byte
  byte res2 = SPI.transfer (0x00); //recibimos el segundo byte
  digitalWrite(ss, HIGH); //deshabilitamos el ADC
  word res = (res1 << 8); //corremos 8 bits a la izquierda
  res = res | res2; //juntamos los dos byte recibidos
  res = res >> 3; //movemos tres bits hacia la derecha
  Serial.print(res, DEC); //mostramos en pantalla el valor
  Serial.print("\n");
  float pH = (((res*0.004883)-0.08041)/0.3202); //calculamos el valor de pH
  Serial.print("Valor de pH "); //mostramos el pH en pantalla
  Serial.println(pH, 2);
  delay(500);
}
```

MEDICIÓN DE PH

10.4. Anexo 5. Presupuesto

Se ha realizado un presupuesto orientativo para tener una idea del coste aproximado del sistema. A esto habría que añadir el coste de fabricación del PCB y la mano de obra.

Tabla 2. Presupuesto.

Componente	Precio	Cantidad	Total
TLC2272IP	1.89	1	1.89
TC1044SEPA	0.966	1	0.966
MCP3001IP	1.65	1	1.65
L7805CD2T-TR	0.517	1	0.517
Condensador SMD 2,2nF	0.035	1	0.035
Condensador SMD 1uF	0.072	2	0.144
Condensador SMD 10uF	0.149	1	0.149
Condensador SMD 100nF	0.016	3	0.048
Conector BNC	2.24	1	2.24
Jack Alimentación	0.381	1	0.381
Condensador 10uF	0.096	4	0.384
Condensador 100uF	0.22	1	0.22
Potenciómetro 10k	1.32	2	2.64
Resistencia SMD	0.126	5	0.63
<b>Total</b>			<b>11.894 €</b>

La mano de obra a un precio 50 €/hora son:

$$15 \text{ semanas} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 2 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * 50 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 7500 \text{ €}$$

El coste de la mano de obra es de **7500 €**.