

Sensor Capacitivo de Nivel: HydraCap

Marco Alejandro Morales Pantoja

Pablo De Jesús Arcila Mora

1. Aplicaciones

- Medición de nivel de agua en tanques portátiles.
- Control en sistemas de almacenamiento domésticos e industriales.
- Monitoreo de nivel en sistemas de riego automatizado.
- Control de nivel en sistemas domésticos.
- Supervisión de tanques de reserva para equipos de bombeo.
- Monitoreo en sistemas de bajo consumo alimentados por baterías de 9 V.

2. Descripción General

El sensor capacitivo de nivel HydraCap permite medir de forma continua y confiable el nivel de agua en tanques o depósitos. Su funcionamiento se adapta a sistemas de control y monitoreo que requieren bajo consumo energético y buena estabilidad en la lectura. Opera dentro de un rango de detección de 20–60 mm, ofreciendo una señal analógica proporcional al nivel de agua, fácilmente integrable con microcontroladores. Su diseño compacto lo hace adecuado para aplicaciones domésticas, industriales o experimentales.

3. Principio de Funcionamiento

El dispositivo se basa en el principio de la capacitancia, formado por un par de electrodos dispuestos de manera paralela. La capacitancia depende del área de los electrodos, la distancia entre ellos y la permitividad del medio dieléctrico. Cuando el medio cambia (por ejemplo, de aire a agua), la constante dieléctrica también varía, modificando la capacitancia según:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

donde C es la capacitancia (F), ε_r la permitividad relativa del medio, ε_0 la del vacío ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m), A el área (m^2) y d la distancia (m). El circuito de acondicionamiento convierte esas variaciones en una señal analógica proporcional al nivel del líquido, con respuesta continua y estable.

4. Especificaciones Eléctricas

Cuadro 1: Especificaciones Eléctricas del Sensor HydraCap

Parámetro	Símbolo	Valor / Condición
Tensión de alimentación	V_{CC}	9–12 V
Señal de salida (rango)	V_{out}	2061,47–2804,57 mV
Impedancia de salida	Z_{out}	2,2 k Ω (a 1 kHz)
Consumo de corriente	I_{CC}	15–20 mA
Temperatura de operación	T	20 °C
Medio de prueba	—	Agua potable y destilada
Rango efectivo de nivel	L_{ef}	20–60 mm

5. Procedimiento Experimental

Las mediciones se realizaron entre 20–60 mm, en pasos de 10 mm. La señal de salida fue registrada con un ESP32 en condiciones de llenado y vaciado del tanque, para evaluar precisión, exactitud, linealidad, sensibilidad e histéresis. Los resultados consolidados se presentan a continuación.

Cuadro 2: Parámetros de Rango de Operación

Parámetro	Símbolo	Valor - Unidad
Nivel máximo	L_{max}	60 mm
Nivel mínimo	L_{min}	20 mm
Rango de nivel	ΔL	40 mm
Tensión de salida máxima	$V_{out,max}$	2804,57 mV
Tensión de salida mínima	$V_{out,min}$	2061,47 mV
Rango de señal de salida	ΔV_{out}	743,10 mV

Cuadro 3: Promedios de Nivel y Señal de Salida

Nivel (mm)	Ascenso (mm)	Descenso (mm)	Ascenso (mV)	Descenso (mV)	Ideal (mV)
20	20,78 \pm 0,84	21,21 \pm 0,37	2070,97 \pm 33,20	2076,23 \pm 12,38	2061,47
30	30,22 \pm 1,62	30,14 \pm 0,34	2248,23 \pm 29,64	2248,07 \pm 9,98	2287,24
40	39,65 \pm 1,76	39,56 \pm 0,42	2419,10 \pm 34,33	2417,30 \pm 10,26	2473,02
50	50,46 \pm 1,64	50,56 \pm 0,68	2620,53 \pm 32,15	2625,10 \pm 8,67	2658,79
60	60,66 \pm 1,37	60,88 \pm 0,68	2804,57 \pm 25,03	2813,17 \pm 8,68	2804,57

Cuadro 4: Resultados de Inexactitud y Exactitud

Nivel (mm)	Inexact. Asc. (mm)	Inexact. Des. (mm)	Exactitud Asc. (%)	Exactitud Des. (%)
20	0,78	1,21	96,26	94,31
30	0,22	0,14	99,28	99,52
40	0,35	0,44	99,11	98,90
50	0,46	0,56	99,10	98,89
60	0,66	0,88	98,92	98,55

Cuadro 5: Histéresis y No Linealidad

	Histéresis (Asc–Des)	No linealidad Asc.	No linealidad Des.
Máximo (mm)	3,38	3,94	2,00
FSO (%)	8 %	10 %	5 %

Cuadro 6: Parámetros de Sensibilidad para Ascenso y Descenso

Parámetro	Ascenso	Descenso
m	0,0542	0,0539
b	-91,568	-90,758

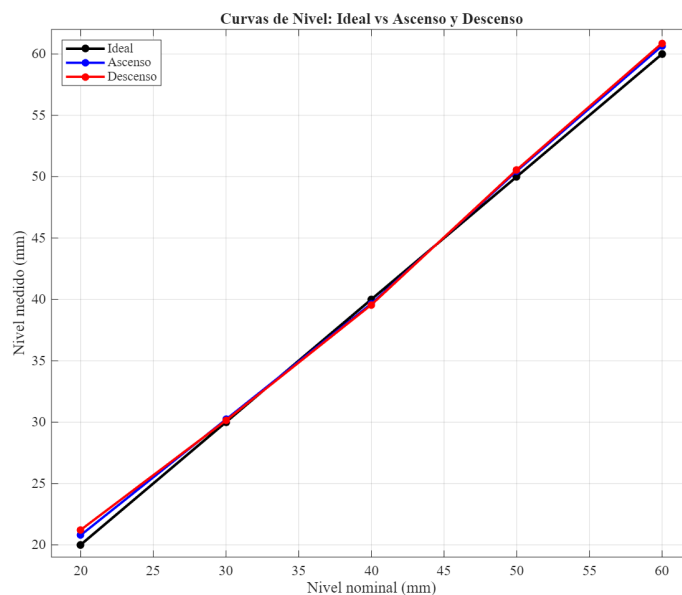


Figura 1: Curvas comparativas de nivel: ideal, ascenso y descenso.

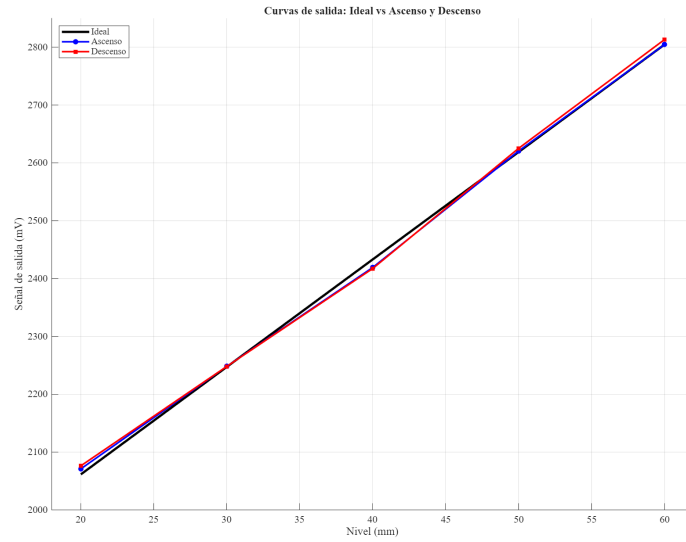


Figura 2: Gráfico comparativo de niveles y señal de salida.

6. Características Estáticas

En esta sección se presentan los resultados consolidados obtenidos de las mediciones experimentales, que reflejan el comportamiento final del sensor dentro de su rango operativo. Los valores mostrados corresponden a los parámetros más representativos para referencia técnica.

Cuadro 7: Parámetros Estáticos del Sensor HydraCap

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Precisión mínima	P_{min}	94,63	%
Exactitud mínima	E_{min}	94,31	%
No linealidad (ascenso)	NL_{asc}	10	% FSO
No linealidad (descenso)	NL_{des}	5	% FSO
Histéresis máxima	H_{max}	8	% FSO
Nivel mínimo	L_{min}	20	mm
Nivel máximo	L_{max}	60	mm
Rango de nivel	ΔL	40	mm
Tensión de salida mínima	V_{min}	2061,47	mV
Tensión de salida máxima	V_{max}	2804,57	mV
Rango de señal de salida	ΔV	743,10	mV
Sensibilidad (ascenso)	M_{asc}	0,0542	mV/mm
Sensibilidad (descenso)	M_{des}	0,0539	mV/mm
Relación nivel–señal promedio	K	18,6	mV/mm

Las características estáticas del sensor HydraCap evidencian un desempeño estable, confiable y dentro de los márgenes esperados para sistemas de medición de corto rango. Los resultados muestran una buena correspondencia entre el nivel real y la señal analógica de salida, con adecuada linealidad, baja histéresis y error global reducido.

7. Partes de conexión y ensamble

En esta sección se presentan las etapas que componen el sensor de nivel capacitivo. El circuito se compone de tres etapas: un filtro/ganancia tipo puente de Wien que fija una banda de paso y fase nula, un comparador con histéresis que convierte la señal en onda cuadrada limpia, y un convertidor frecuencia a tensión LM2907 que entrega un voltaje proporcional a la frecuencia de entrada según $V_{out} = V_{cc}fC_1R_1$.

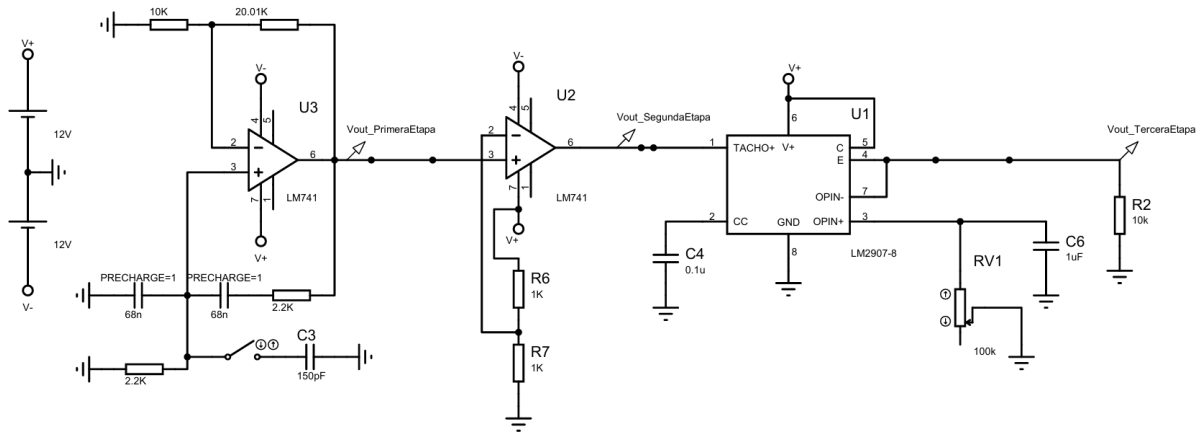


Figura 3: Esquemático del sensor capacitivo de nivel HydraCap.

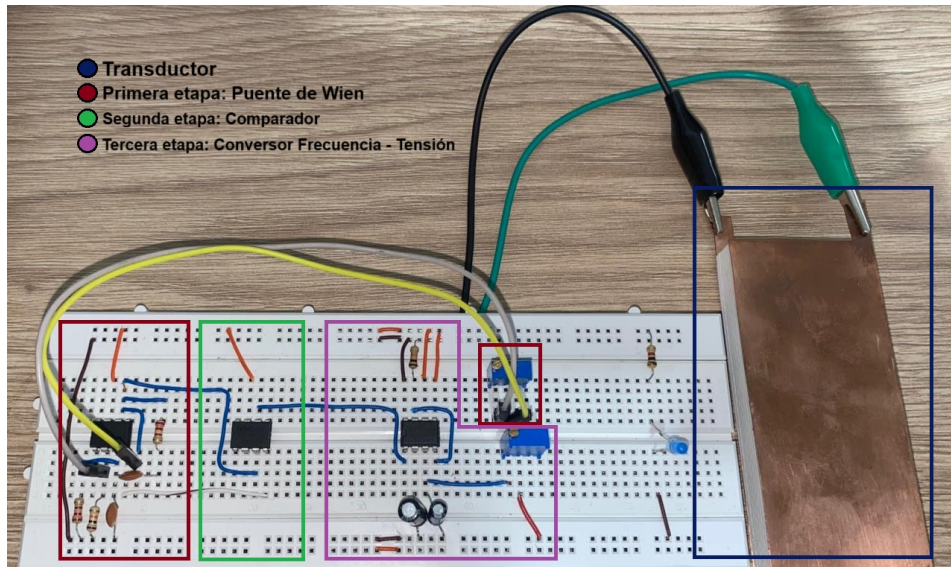


Figura 4: Montaje del sensor capacitivo de nivel HydraCap Seccionado por etapas.

7.1. Transductor

El transductor está formado por dos placas de cobre paralelas que actúan como un capacitor cuya capacitancia varía con el nivel del líquido entre ellos, al cambiar el medio dieléctrico de aire a agua, la permitividad relativa se modifica, alterando la capacitancia, como se indicó con anterioridad, según la relación: $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$, donde C es la capacitancia, ϵ_r la permitividad relativa del medio, ϵ_0 la del vacío, A el área efectiva de las placas de cobre y d la distancia entre ellas.

7.2. Primera etapa: Puente oscilador de Wien

La red RC serie-paralelo del puente de Wien opera como un filtro pasabanda de segundo orden con 0° de desfase en su frecuencia central, permitiendo el paso de la señal de interés y suprimiendo componentes fuera de banda. En configuración simétrica, donde $R_1 = R_2 = R$ y $C_1 = C_2 = C$, la frecuencia de operación se define por $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$. La red suministra aproximadamente un tercio de la señal al amplificador no inversor, requiriendo una ganancia mínima de 3 para lograr oscilación estable o un ajuste inferior cuando se utiliza como filtro activo.

7.3. Segunda etapa: Comparador con histéresis

El comparador con histéresis recibe la señal senoidal del puente de Wien y la convierte en una onda cuadrada estable, eliminando variaciones por ruido, funciona mediante realimentación positiva, estableciendo dos umbrales de conmutación que definen la histéresis. La salida cambia de estado solo cuando la señal de entrada supera estos niveles, asegurando una transición limpia, el umbral de referencia se determina por el divisor resistivo de realimentación, expresado como: $V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out}$, donde V_{TH} es la tensión umbral, R_1 y R_2 son las resistencias del divisor y V_{out} la tensión de salida del comparador. Esta etapa entrega una señal cuadrada precisa para el siguiente bloque de conversión.

7.4. Tercera etapa: Convertidor frecuencia a tensión

El convertidor LM2907 transforma la señal cuadrada del comparador en una tensión continua proporcional a su frecuencia, lo que facilita la medición analógica del nivel del líquido, la conversión depende de los componentes R_1 y C_1 , definidos por la relación: $V_{out} = V_{cc} f C_1 R_1$, donde V_{out} es la tensión de salida, V_{CC} la tensión de alimentación, f la frecuencia de entrada, C_1 el capacitor de integración y R_1 la resistencia de carga. Esta etapa proporciona una salida lineal y estable, directamente proporcional al nivel detectado por el sensor.

7.5. Consideraciones finales

El código usado para la extracción de datos puede consultarse y descargarse en el siguiente repositorio:

Link: Repositorio HydraCap

En este también se pueden encontrar los datos obtenidos para la identificación del sensor así como los cálculos realizados para reportar las características estáticas del mismo, así como una copia de este datasheet.

El código debe cargarse a un esp32, el pin ADC se puede configurar a criterio del usuario, sin embargo se usa por defecto en el código el pin 36.