

Diseño y evaluación de Lab-on-a-Chip de conductividad eléctrica para la detección de aceite automotriz en agua destilada

Design and Evaluation of an Electrical Conductivity Lab-on-a-Chip for the Detection of Automotive Oil in Distilled Water

Carlos Eduardo Cañedo-Figueroa^{1*}, Humberto Alexander Enriquez-Lopez¹, Sandra Guadalupe Chavarría-Hidalgo¹, Luis Arturo Camacho-Silvas¹ y Janette Guadalupe Moreno-González¹

¹Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas. Circuito Universitario 31109, UACH Campus II, 31125 Chihuahua, Chih. México.

*Correspondencia: Correo electrónico: ccanedo@uach.mx (Carlos Eduardo Cañedo-Figueroa)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v20i1.2241>

Recibido: 20 de febrero de 2026; **Aceptado:** 06 de mayo de 2026

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Vladimir Villarreal-Contreras

Resumen

En el presente trabajo se describe el diseño, fabricación y evaluación experimental de un sistema de detección de aceite automotriz usado en agua destilada, empleando módulos desechables tipo lab-on-a-chip (LoC) fabricados sobre placas fenólicas mediante fresado CNC y un circuito de medición basado en divisor de voltaje con un microcontrolador Arduino Nano. Se prepararon emulsiones de aceite de motor SAE 20W-50 en agua destilada a concentraciones del 1, 5, 10, 15 y 20 % v/v, utilizando agitación en vortex y centrifugación. Se realizaron tres experimentos modificando el valor de la resistencia del divisor de voltaje (464 Ω y 4.7 k Ω) con el fin de evaluar la estabilidad de la señal y la relación entre la concentración de aceite y la lectura del convertidor analógico-digital (ADC). Los resultados demostraron que la presencia de aceite modifica la conductividad del medio; sin embargo, no se observó una relación proporcional directa entre la concentración y la señal obtenida, lo que se atribuye a la naturaleza heterogénea de las emulsiones, efectos de electrólisis generados por corriente directa y limitaciones de la resolución del ADC ante señales de muy baja amplitud. El trabajo aporta evidencia experimental sobre las limitaciones del método de corriente directa para este tipo de aplicación y orienta el desarrollo de trabajos futuros basados en excitación de corriente alterna y espectroscopía de impedancia.

Palabras clave: Lab-on-a-Chip, aceite en agua, conductividad eléctrica, Arduino Nano.

Abstract

This paper describes the design, manufacture, and experimental evaluation of a system for detecting used automotive oil in distilled water, using disposable lab-on-a-chip (LoC) modules manufactured on phenolic plates by CNC milling and a voltage divider-based measurement circuit with an Arduino Nano microcontroller. SAE 20W-50 motor oil emulsions were prepared in distilled water at concentrations of 1, 5, 10, 15, and 20 % v/v, using vortex agitation and centrifugation. Three experiments were performed by modifying the resistance value of the voltage divider (464 Ω and 4.7 k Ω) in order to evaluate the stability of the signal and the relationship between the oil concentration and the analog-to-digital converter (ADC) reading. The results showed that the presence of oil modifies the conductivity of the medium; however, no direct proportional relationship was observed between the concentration and the signal obtained, which is attributed to the heterogeneous nature of the emulsions, electrolysis effects generated by direct current, and limitations of the ADC resolution in the presence of very low amplitude signals. The work provides experimental evidence on the limitations of the direct current method for this type of application and guides the development of future work based on alternating current excitation and impedance spectroscopy.

Keywords: Lab-on-a-Chip, oil in water, electrical conductivity, Arduino Nano.

1. Introducción

La contaminación del agua por hidrocarburos de origen automotriz representa un problema ambiental relevante en contextos urbanos e industriales. En talleres mecánicos, estaciones de servicio y zonas de mantenimiento vehicular, el aceite de motor usado puede incorporarse a efluentes acuosos generando contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Strugała-Wilczek et al., 2022). La detección oportuna y cuantitativa de aceite en agua constituye una necesidad técnica con implicaciones tanto ambientales como de salud pública.

Desde el ámbito de la ingeniería biomédica e instrumentación, los dispositivos de tipo lab-on-a-chip (LoC) representan una alternativa de bajo costo y alta integración para la medición de parámetros fisicoquímicos en fluidos. Estos dispositivos integran microcanales y electrodos en un sustrato compacto, permitiendo la medición de propiedades eléctricas como la conductividad o la impedancia a partir de volúmenes de muestra del orden de los microlitros (Mark et al., 2010). La conductividad eléctrica es una propiedad directamente relacionada con la presencia de iones en solución; dado que el aceite automotriz es un material dieléctricamente aislante con una resistividad del orden de 10^{12} $\Omega \cdot \text{cm}$ (Zhang et al., 2017), su incorporación a una solución acuosa reduce la conductividad del medio de manera proporcional a su concentración, lo que constituye el principio de detección del presente trabajo.

La medición de conductividad mediante microcontroladores de bajo costo como el Arduino Nano ha sido implementada en diversas plataformas de monitoreo de calidad del agua (Riboldi et al., 2023). Estos sistemas emplean típicamente un circuito divisor de voltaje donde la celda de medición actúa como elemento variable, cuyo valor de resistencia se calcula a partir de la lectura del convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador. Sin embargo, el uso de corriente directa (CD) en este tipo de mediciones genera el fenómeno de electrólisis y polarización de electrodos, lo que introduce

variaciones en la señal que dificultan la obtención de mediciones estables y reproducibles (Ishai et al., 2013).

En este contexto, el presente trabajo plantea el diseño y la evaluación experimental de un sistema LoC desechable de bajo costo para la detección de aceite SAE 20W-50 en agua destilada, empleando un microcontrolador Arduino Nano como sistema de adquisición. Como hipótesis se plantea que, a mayor concentración de aceite en agua, la conductividad eléctrica disminuya, esto con la finalidad de lograr estandarizar la técnica de detección de aceite presente en el agua. Los objetivos específicos fueron: (a) fabricar módulos LoC desechables sobre placa fenólica mediante fresado CNC; (b) preparar emulsiones de referencia con concentraciones controladas de aceite en agua; (c) evaluar el comportamiento de la señal del ADC en función de la concentración de aceite bajo diferentes configuraciones del circuito divisor de voltaje, y (d) identificar las limitaciones del método de excitación en corriente directa para este tipo de aplicación.

2. Materiales y métodos

2.1. Fabricación del dispositivo Lab-on-a-Chip

Se diseñaron y fabricaron módulos desechables tipo Lab-on-a-chip sobre placas fenólicas (Fig. 1), material seleccionado por su baja porosidad, rigidez mecánica y facilidad de mecanizado. El diseño del canal de medición se realizó en el software Proteus, el cual permitió definir la geometría del canal donde se deposita la gota de muestra, así como la disposición de los electrodos de cobre expuestos.

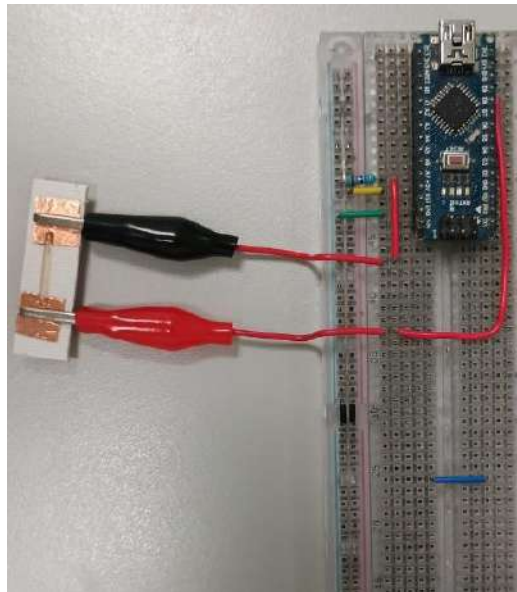


Figura 1. Dispositivo de medición con Arduino Nano. Se observa el circuito divisor de voltaje sobre protoboard y la conexión mediante pinzas cocodrilo al módulo LoC desechable.

Figure 1. Measurement device using an Arduino Nano. The voltage divider circuit on the breadboard and the connection to the disposable LoC module via alligator clips are shown.

La configuración de los parámetros de corte, incluyendo la profundidad de fresado y la velocidad de avance, se realizó mediante el software FlatCAM. La transferencia del diseño a máquina CNC y la ejecución del proceso de fresado se llevaron a cabo con el software Candle.

El dispositivo resultante consiste en un microcanal lineal con dos electrodos de cobre expuestos en sus extremos, sobre los cuales se deposita la muestra de emulsión (Fig. 1). La conexión eléctrica al circuito de medición se realizó mediante pinzas tipo cocodrilo, lo que permite el intercambio rápido de los chips desechables entre mediciones y garantiza la utilización de un módulo nuevo por cada muestra, evitando la contaminación cruzada entre concentraciones (Fig. 2).

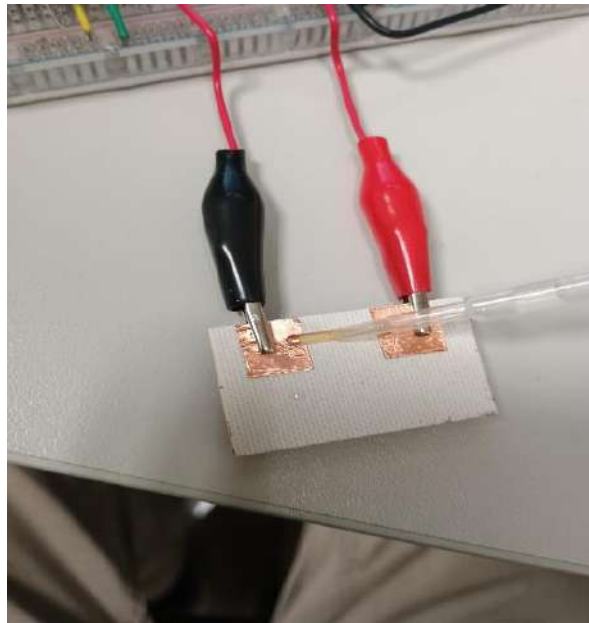


Figura 2. Aplicación de la disolución de aceite en agua sobre el módulo LoC. La muestra se depositó con pipeta desechable hasta alcanzar el nivel de la superficie del canal.

Figure 2. Application of the oil-in-water solution to the LoC module. The sample was dispensed using a disposable pipette until it reached the surface of the channel.

2.2. Preparación de las emulsiones de referencia

Se prepararon cinco emulsiones de aceite de motor usado SAE 20W-50 en agua destilada a concentraciones del 1, 5, 10, 15 y 20 %, v/v, para un volumen total de 10 mL por emulsión (Fig. 3). El aceite utilizado presentó una densidad aproximada de 0.85 a 0.89 g/mL. Las proporciones volumétricas preparadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Proporciones volumétricas (v/v) de las emulsiones de aceite SAE 20W-50 en agua destilada.
Table 1. Volume ratios (v/v) of SAE 20W-50 oil emulsions in distilled water.

Concentración (% v/v)	Volumen de aceite (mL)	Volumen de agua destilada (mL)	Volumen total (mL)
1	0.1	9.9	10
5	0.5	9.5	10
10	1.0	9.0	10
15	1.5	8.5	10
20	2.0	8.0	10

El procedimiento de preparación de cada emulsión consistió en los siguientes pasos: (1) medir el volumen de agua destilada con pipeta graduada y transferirlo al tubo Falcon; (2) medir el volumen de aceite correspondiente y adicionarlo lentamente sobre el agua; (3) tapar el tubo de forma hermética; (4) someter la mezcla a agitación en vortex a velocidad máxima durante 1 minuto, con el objetivo de generar micropartículas de aceite y simular las condiciones de turbulencia presentes en efluentes ambientales; (5) centrifugar a 3 000 rpm durante 5 minutos para evaluar la estabilidad de la emulsión. Los materiales y equipos empleados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales y equipos empleados en la preparación de las emulsiones y el sistema de medición.
Table 2. Materials and equipment used in the preparation of the emulsions and the measurement system.

Material / Reactivo	Especificación
Agua destilada	Grado laboratorio
Aceite de motor usado	SAE 20W-50, densidad 0.85 – 0.89 g/mL
Tubos Falcon con tapa	15 mL
Pipetas graduadas	1 mL y 2 mL
Vortex	Velocidad máxima
Centrífuga	3 000 rpm
Placas fenólicas (FR-2)	Para fabricación de chips
Máquina CNC	Fresado de microcanal
Arduino Nano	Microcontrolador ATmega328P, ADC 10 bits, 5 V
Resistencia	464 Ω (Exp. 1) y 4.7 k Ω (Exp. 2 y 3)
Protoboard y cables cocodrilo	Para circuito divisor de voltaje
Pipetas desechables de 1 mL	Aplicación de muestra al chip

Como se aprecia en la Fig. 3, las emulsiones presentaron una tonalidad que varía de blanco lechoso a amarillo turbio en función de la concentración. La muestra al 15 % evidenció la formación de un anillo marrón en la parte superior del tubo, indicativo de una separación parcial de fases tras la centrifugación, lo cual es consistente con la naturaleza hidrofóbica del aceite y con la ausencia de un agente emulsificante en las formulaciones preparadas.

2.3. Circuito de medición

El sistema de medición se basó en un circuito divisor de voltaje conformado por una resistencia de referencia (R_{ref}) en serie con la celda del chip LoC, que actúa como resistencia variable (R_{chip}) en función de la conductividad de la muestra depositada. El voltaje en el nodo intermedio del divisor fue adquirido por el pin analógico A0 del Arduino Nano, el cual cuenta con un ADC de 10 bits y referencia de 5 V, proporcionando una resolución de 4.88 mV por cuenta (1 024 niveles en total). El circuito responde a la ecuación (Ec. 1)

$$V_{ADC} = V_{CC} \times R_{chip} / (R_{ref} + R_{chip}) \quad (Ec. 1)$$

En donde $V_{CC} = 5$ V es el voltaje de alimentación. Con este circuito, un mayor valor de R_{chip} (menor conductividad de la muestra, es decir, mayor concentración de aceite aislante) produce un mayor voltaje en el nodo y una lectura ADC más alta.

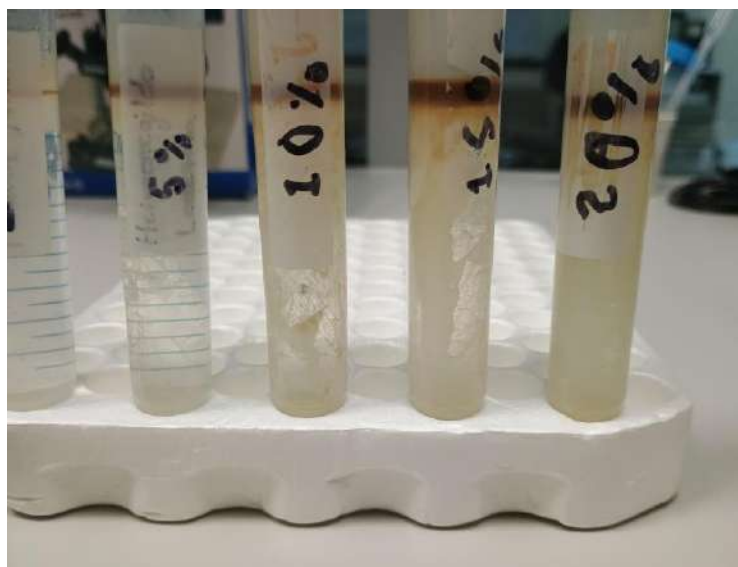


Figura 3. Emulsiones de aceite SAE 20W-50 en agua destilada a concentraciones de 5, 10, 15 y 20 % v/v (de izquierda a derecha) tras la agitación en vortex. Se observa incremento en la turbidez y tonalidad amarillenta conforme aumenta la concentración, así como separación de fase en la muestra del 15 %.

Figure 3. Emulsions of SAE 20W-50 oil in distilled water at concentrations of 5, 10, 15, and 20% v/v (from left to right) after vortex mixing. An increase in turbidity and a yellowish tint are observed as the concentration increases, as well as phase separation in the 15% sample.

Se evaluaron dos valores de R_{ref} con el objetivo de estudiar su efecto sobre la estabilidad de la señal. En el experimento 1 se utilizó $R_{ref} = 464 \Omega$, mientras que en los experimentos 2 y 3 se incrementó a $R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$. Este aumento tiene como efecto una reducción aproximada de diez veces en la corriente que circula por el circuito, lo cual busca disminuir los efectos de polarización y electrólisis en los electrodos del chip. Las lecturas del ADC fueron registradas continuamente durante 20 segundos (20 000 ms) a una frecuencia de muestreo determinada por la velocidad de procesamiento del Arduino Nano.

2.4. Protocolo experimental

Se realizaron tres experimentos consecutivos. En todos ellos se aplicaron las cinco emulsiones al chip LoC mediante pipeta desechable de 1 mL, depositando el volumen suficiente para cubrir la superficie del canal hasta el nivel de los electrodos (Fig. 2). Entre cada medición se reemplazó el chip por un módulo nuevo para evitar la contaminación cruzada. El experimento 1 empleó $R_{ref} = 464 \Omega$. Ante la falta de proporcionalidad observada, los experimentos 2 y 3 se realizaron con $R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$, repitiendo las mediciones de forma independiente para verificar la reproducibilidad de los resultados.

3. Resultados y discusión

3.1. Experimento 1: $R_{ref} = 464 \Omega$

En el experimento 1, las lecturas del ADC oscilaron en rangos de alta amplitud para todas las concentraciones evaluadas, como se muestra en las gráficas de la Fig. 4. Los valores medios aproximados obtenidos por concentración fueron: 563 (1 %), 589 (5 %), 534 (10 %), 602 (15 %) y 548 (20 %). Estos valores no presentan una relación monótona con la concentración de aceite; en particular, la concentración del 5 % exhibió un valor ADC superior al del 10 %, lo que resulta inconsistente con la hipótesis de que una mayor concentración de aceite genera mayor resistencia eléctrica y, por lo tanto, una lectura ADC mayor.

Adicionalmente, se observó una tendencia decreciente en la señal a lo largo del tiempo en la muestra del 1 %, con valores que pasaron de aproximadamente 573 al inicio a 563 al final del periodo de medición. Esta deriva temporal es consistente con el fenómeno de polarización de electrodos generado por la corriente directa, donde la acumulación de cargas en la interfaz electrodo-líquido modifica la impedancia efectiva de la celda de medición de forma dinámica. La elevada dispersión de los datos (puntos con separaciones de hasta 30 unidades ADC respecto a la media) confirma la inestabilidad de la señal bajo excitación en CD con resistencia de baja impedancia.

3.2. Experimento 2: $R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$ (Primera repetición)

Al incrementar R_{ref} a $4.7 \text{ k}\Omega$, la corriente que circuló por el circuito se redujo aproximadamente diez veces respecto al experimento 1. Como consecuencia, las lecturas del ADC disminuyeron a valores en el rango de 3 a 13 unidades (de un total de 1 023), lo que evidencia que el nivel de señal resultó excesivamente bajo para la resolución del ADC del Arduino Nano. En estas

condiciones, cada unidad de conteo representa un cambio de voltaje de 4.88 mV, por lo que la señal de la celda LoC quedó prácticamente en el piso de ruido del convertidor.

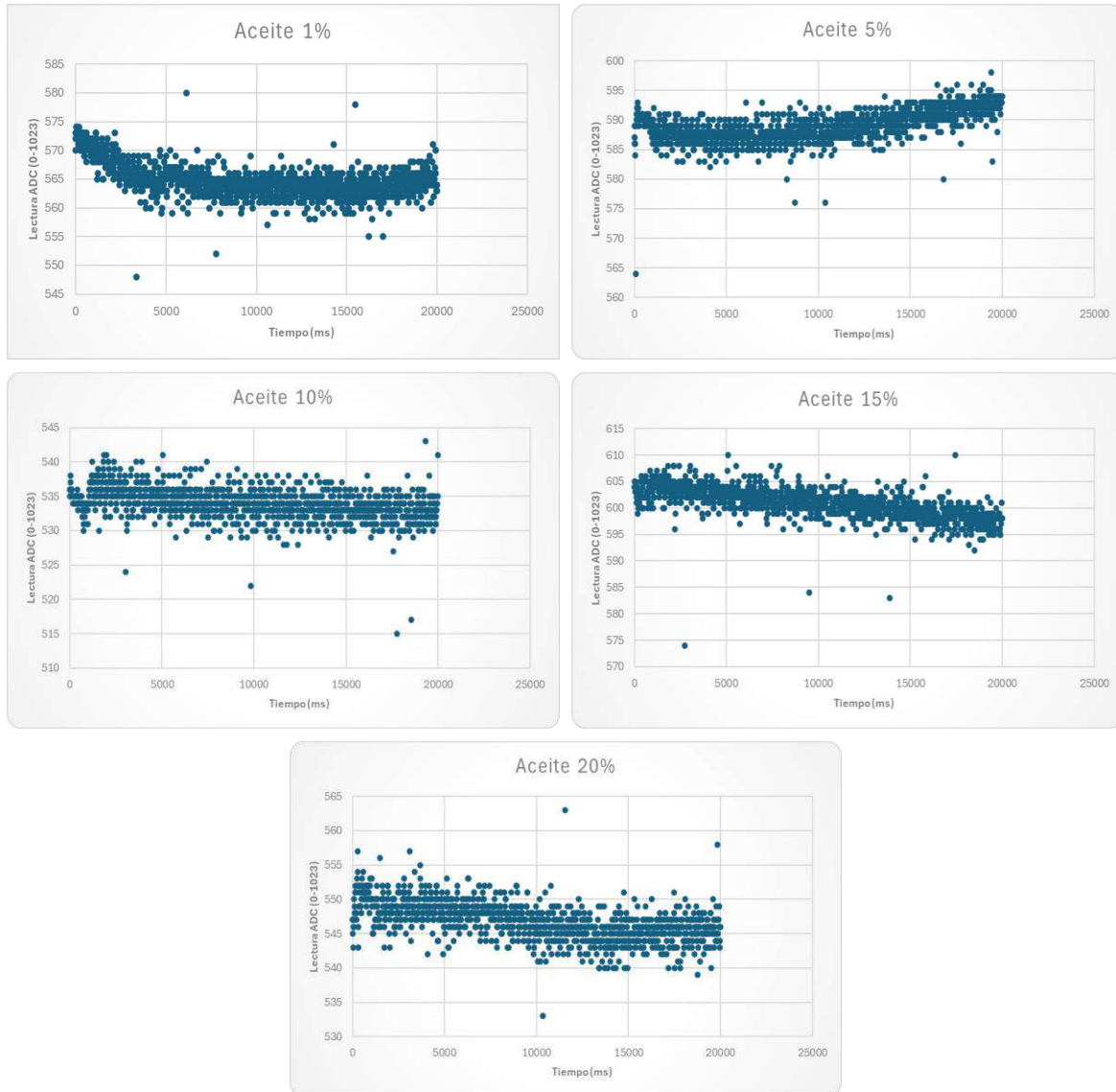


Figura 4. Lecturas del ADC (0–1 023) en función del tiempo (ms) para las concentraciones de 1, 5, 10, 15 y 20 % v/v en el experimento 1 ($R_{ref} = 464 \Omega$). Se observa alta dispersión de los datos y ausencia de una tendencia proporcional entre concentración y señal ADC.

Figure 4. ADC readings (0–1,023) as a function of time (ms) for concentrations of 1, 5, 10, 15, and 20% v/v in Experiment 1 ($R_{ref} = 464 \Omega$). The data show high dispersion, and there is no linear relationship between concentration and ADC signal.

A pesar de lo anterior, la morfología de las curvas mejoró respecto al experimento 1: los datos presentaron líneas más continuas y una dispersión notablemente menor, lo cual sugiere que la reducción de corriente contribuyó a disminuir los efectos de electrólisis. Los valores medios aproximados obtenidos por concentración fueron: 5–6 (1 %), 9–11 (5 %), 4–6 (10 %), 6–8 (15 %) y 7–11 (20 %). La relación entre concentración y lectura ADC continuó siendo no proporcional, con la concentración del 5 % presentando de nuevo un valor anómalo superior al del 10 % (Fig. 5).

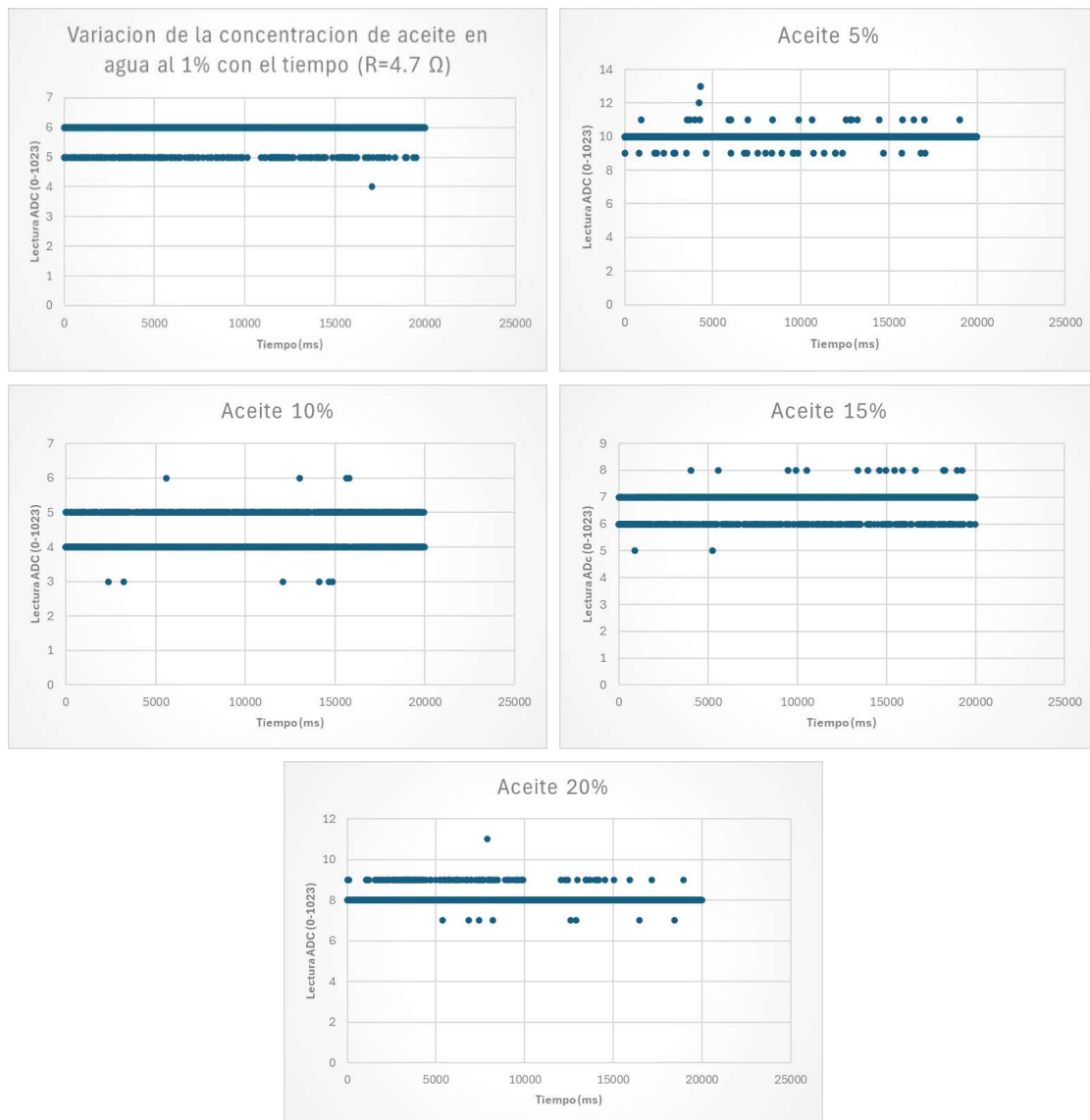


Figura 5. Lecturas del ADC (0–1 023) en función del tiempo (ms) para las concentraciones de 1, 5, 10, 15 y 20 % v/v en el experimento 2 ($R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$). Las lecturas se concentran en valores de 3 a 13, próximos al piso de ruido del ADC, aunque con mayor estabilidad temporal que en el experimento 1.

Figure 5. ADC readings (0–1,023) as a function of time (ms) for concentrations of 1, 5, 10, 15, and 20% v/v in Experiment 2 ($R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$). The readings are concentrated in the range of 3 to 13, close to the ADC's noise floor, although with greater temporal stability than in Experiment 1.

3.3. Experimento 3: $R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$ (Segunda repetición)

El experimento 3 se realizó con la misma configuración del experimento 2 con el objetivo de verificar la reproducibilidad de los resultados y descartar un error en la preparación de las emulsiones como causa de la falta de proporcionalidad observada.

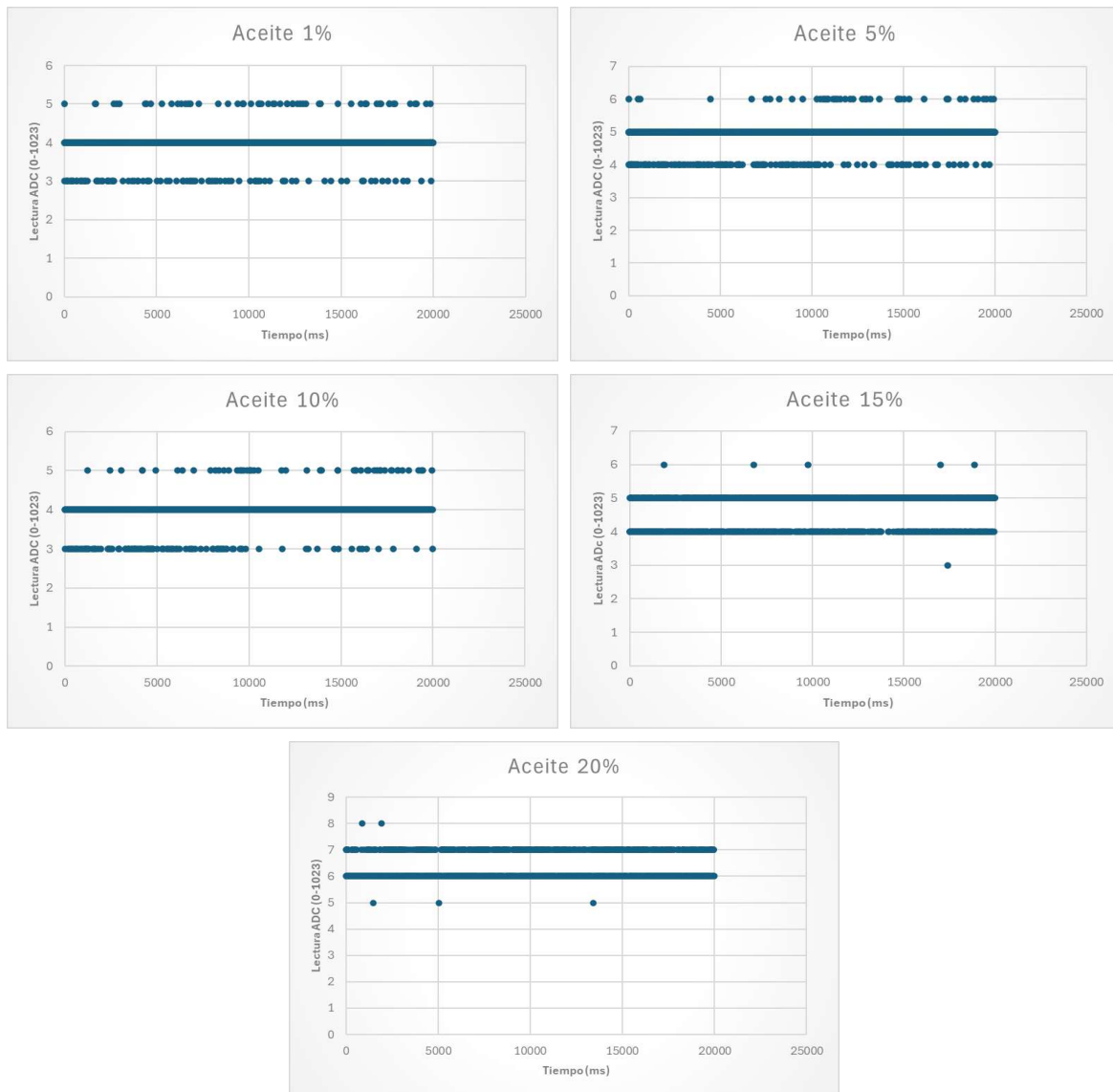


Figura 6. Lecturas del ADC (0–1 023) en función del tiempo (ms) para las concentraciones de 1, 5, 10, 15 y 20 % v/v en el experimento 3 ($R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$, segunda repetición). Los resultados replican el comportamiento del experimento 2, confirmando la reproducibilidad del fenómeno observado.

Figure 6. ADC readings (0–1,023) as a function of time (ms) for concentrations of 1, 5, 10, 15, and 20% v/v in Experiment 3 ($R_{ref} = 4.7 \text{ k}\Omega$, second replicate). The results replicate the behavior observed in Experiment 2, confirming the reproducibility of the phenomenon.

Los resultados obtenidos replicaron el comportamiento del experimento 2: las lecturas del ADC se mantuvieron en el rango de 3 a 8 unidades para todas las concentraciones, con una estabilidad temporal similar y sin una tendencia monótona en función de la concentración de aceite. Los valores medios aproximados por concentración fueron: 3–5 (1 %), 4–6 (5 %), 3–5 (10 %), 4–6 (15 %) y 6–8 (20 %) (Fig. 6).

La reproducibilidad de los resultados entre los experimentos 2 y 3, incluyendo la aparición del mismo valor anómalo en la concentración del 5 %, indica que el fenómeno observado no se debe a un error en la preparación de las disoluciones, sino a una limitación fundamental del principio de medición empleado bajo excitación en corriente directa.

La Tabla 3 resume los rangos de lectura ADC obtenidos para cada concentración y experimento, permitiendo la comparación sistemática de los tres ensayos realizados.

Tabla 3. Resumen de los rangos de lectura ADC obtenidos en los tres experimentos para cada concentración de aceite evaluada.

Table 3. Summary of the ADC reading ranges obtained in the three experiments for each oil concentration evaluated.

Concentración (% v/v)	Exp 1 (464 Ω) Media ADC	Exp 1 Dispersión	Exp 2 (4.7 k Ω) Media ADC	Exp 3 (4.7 k Ω) Media ADC
1	~563	Alta	5 – 6	3 – 5
5	~589	Alta	9 – 11	4 – 6
10	~534	Media	4 – 6	3 – 5
15	~602	Alta	6 – 8	4 – 6
20	~548	Media	7 – 11	6 – 8

Los resultados obtenidos en los tres experimentos muestran que la medición de conductividad eléctrica mediante corriente directa en el sistema LoC propuesto no presenta una relación proporcional directa con la concentración de aceite, aun cuando el aceite es eléctricamente aislante. Este comportamiento puede explicarse a partir de dos fenómenos principales: la naturaleza heterogénea de las emulsiones agua-aceite y los efectos electroquímicos asociados al uso de corriente directa.

En cuanto a la heterogeneidad de la emulsión, la distribución espacial de las microgotas de aceite dentro del canal de medición varía en cada medición, ya que no se emplea ningún agente emulsificante que garantice una dispersión uniforme y estable. La corriente eléctrica fluye principalmente a través de las regiones continuas de agua, por lo que pequeñas variaciones en la disposición de las gotas de aceite generan cambios importantes en los caminos de conducción, produciendo lecturas inconsistentes entre concentraciones. Esto es consistente con lo reportado por Shi et. al. (2019) quienes demostraron que la distribución de gotas en emulsiones agua-aceite afecta

significativamente la respuesta de sensores de impedancia, incluso cuando la concentración volumétrica permanece constante.

Respecto a los efectos electroquímicos, el uso de corriente directa genera el fenómeno de polarización de electrodos, que consiste en la acumulación de cargas en la interfaz electrodo-líquido formando una doble capa eléctrica que actúa como capacitor, modificando la impedancia efectiva de la celda con el tiempo (Ghafar-Zadeh et al., 2007). En el experimento 1, la resistencia de 464 Ω produjo corrientes del orden de varios miliamperios, suficientes para generar electrólisis visible y una deriva temporal de la señal, especialmente pronunciada en la muestra del 1 % donde la mayor conductividad del agua genera corrientes más elevadas. El incremento de la resistencia a 4.7 k Ω en los experimentos 2 y 3 redujo la corriente aproximadamente diez veces, disminuyendo los efectos de polarización y produciendo señales temporalmente más estables, lo cual está en concordancia con las recomendaciones técnicas para sensores de conductividad con electrodos expuestos (Ishai et al., 2013).

Sin embargo, al reducir la corriente, el voltaje desarrollado sobre la celda LoC también disminuyó a valores extremadamente pequeños, llevando las lecturas del ADC a un rango de 3 a 13 cuentas. Con una resolución de 4.88 mV por cuenta en el ADC de 10 bits del Arduino Nano y 5 V de referencia, cada cuenta representa una variación de conductividad mayor que la diferencia real entre concentraciones, haciendo que el sistema sea incapaz de discriminar entre los distintos porcentajes evaluados. En este sentido, la limitación del sistema no radica únicamente en los efectos electroquímicos, sino en la combinación de baja amplitud de señal y resolución insuficiente del ADC para detectar diferencias de impedancia de alta magnitud con excitación en CD.

La aparición del valor anómalo en la concentración del 5 % en los tres experimentos es relevante. Este comportamiento, reproducido de forma consistente, sugiere que la emulsión al 5 % puede haber presentado una distribución de microgotas diferente a la esperada, posiblemente relacionada con la formación de estructuras de emulsión más estables a esa concentración que facilitan una conductividad levemente mayor. Este fenómeno requiere un estudio más detallado en trabajos futuros mediante análisis de tamaño de partícula y estabilidad de la emulsión.

Para superar las limitaciones identificadas, la literatura especializada señala que la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) con excitación en corriente alterna constituye la alternativa más adecuada para mediciones de conductividad en sistemas microfluidicos. La excitación en CA elimina la acumulación de cargas en la interfaz electrodo-líquido y permite evaluar la impedancia en múltiples frecuencias, obteniendo información sobre la resistencia del medio (relativa al contenido acuoso) y la capacitancia de la interfaz (relacionada con la distribución de gotas de aceite) de forma separada (Gawad et al., 2001). Sistemas reportados en la literatura empleando excitación en CA en el rango de 1 kHz a 1 MHz con electrodos interdigitados han logrado detectar variaciones de contenido de agua en aceite con sensibilidades del orden del 0.12 dB/% (Riboldi et al., 2023), lo que sugiere que una arquitectura similar podría ser aplicada al problema inverso de detectar aceite en agua.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se diseñaron, fabricaron y evaluaron módulos desechables tipo lab on a chip sobre placa fenólica mediante fresado CNC, integrados con un sistema de medición de

conductividad basado en divisor de voltaje y Arduino Nano, para la detección de aceite de motor SAE 20W-50 en agua destilada en concentraciones del 1 al 20 % v/v.

Los resultados de los tres experimentos demostraron que la presencia de aceite modifica la conductividad del medio; sin embargo, no se observó una relación proporcional directa entre la concentración de aceite y la señal del ADC. Este comportamiento se atribuye a la combinación de dos factores: la naturaleza heterogénea de las emulsiones preparadas sin agente emulsificante, que genera distribuciones variables de microgotas entre mediciones, y los efectos de polarización de electrodos e interferencia electroquímica producidos por la excitación en corriente directa.

El incremento de la resistencia del divisor de voltaje de $464\ \Omega$ a $4.7\ \text{k}\Omega$ redujo significativamente los efectos de electrólisis y mejoró la estabilidad temporal de la señal, lo que evidencia la importancia del diseño electrónico en el desempeño de sensores de conductividad. No obstante, esta modificación produjo un nivel de señal excesivamente bajo para la resolución del ADC del Arduino Nano, limitando la capacidad de discriminación entre concentraciones.

La viabilidad técnica del dispositivo LoC desechable fabricado mediante CNC quedó demostrada, representando una plataforma de bajo costo y fácil acceso para el desarrollo de sensores de análisis de fluidos. Los resultados indican, sin embargo, que la medición directa de conductividad bajo excitación en CD no resulta suficiente para estimar de forma lineal y reproducible la concentración de aceite en agua en el rango evaluado.

Como trabajo a futuro, se plantea implementar excitación en corriente alterna en el rango de 1 kHz a 100 kHz mediante la generación de señales PWM filtradas o un generador de señales integrado, con el fin de aplicar espectroscopía de impedancia electroquímica sobre el mismo diseño de chip. Adicionalmente, se contempla evaluar el uso de electrodos interdigitados con mayor área superficial para incrementar la sensibilidad del sistema, y la incorporación de un agente emulsificante de grado técnico para mejorar la homogeneidad y repetibilidad de las emulsiones de referencia.

Contribuciones de los autores

Los autores presentan las siguientes contribuciones: C.E.C.F.: asesor metodológico y técnico de las pruebas experimentales y editor del presente manuscrito; H.A.E.L.: aplicador de pruebas experimentales y gestión de muestreo; S.G.C.H.: asesora y diseñadora de pruebas de laboratorio para mezclado de agua; L.A.C.S.: revisor de técnicas de laboratorio y revisión de redacción y J.G.M.G.: asesora metodológica de laboratorio y revisora del presente manuscrito.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Chihuahua por el apoyo en la prestación de los recursos del laboratorio para la realización de esta investigación,

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

5. Referencias

- Gawad, S., Schild, L., & Renaud, Ph. (2001). Micromachined impedance spectroscopy flow cytometer for cell analysis and particle sizing. *Lab on a Chip*, 1(1), 76. <https://doi.org/10.1039/b103933b>
- Ghafar-Zadeh, E., Sawan, M., & Therriault, D. (2007). Novel direct-write CMOS-based laboratory-on-chip: Design, assembly and experimental results. *Sensors and Actuators A: Physical*, 134(1), 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.05.022>
- Ishai, P. B., Talary, M. S., Caduff, A., Levy, E., & Feldman, Y. (2013). Electrode polarization in dielectric measurements: A review. *Measurement Science and Technology*, 24(10), 102001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/10/102001>
- Mark, D., Haeberle, S., Roth, G., Von Stetten, F., & Zengerle, R. (2010). Microfluidic lab-on-a-chip platforms: Requirements, characteristics and applications. *Chemical Society Reviews*, 39(3), 1153-1182. <https://doi.org/10.1039/b820557b>
- Riboldi, C., Castillo, D. A. C., Crafa, D. M., & Carminati, M. (2023). Contactless Sensing of Water Properties for Smart Monitoring of Pipelines. *Sensors*, 23(4), 2075. <https://doi.org/10.3390/s23042075>
- Shi, H., Zhang, H., Ma, L., & Zeng, L. (2019). A multi-function sensor for online detection of contaminants in hydraulic oil. *Tribology International*, 138, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.025>
- Strugała-Wilczek, A., Kapusta, K., & Pankiewicz-Sperka, M. (2022). Pollutants release from the residues remaining after underground gasification (UCG) of ortho- and meta-lignites. *Fuel*, 327, 125126. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125126>
- Zhang, H., Zeng, L., Teng, H., & Zhang, X. (2017). A Novel On-Chip Impedance Sensor for the Detection of Particle Contamination in Hydraulic Oil. *Micromachines*, 8(8), 249. <https://doi.org/10.3390/mi8080249>

2026 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>