

ESTIMACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE CORTES Y DERRUMBES USANDO TÉCNICAS DE ULTRASONIDO

Leidy L. Arias^a, Rodolfo Villamizar^b, Ana B. Ramirez^c, Jenny M. Carvajal^d

^{a, b, c} *Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia*

^d *Instituto colombiano del petróleo, Piedecuesta, Colombia*

Sinopsis

La implementación de tecnologías efectivas asegura la estabilidad del pozo, minimizando los cierres y pérdidas en operaciones de perforación. Monitorear el flujo volumétrico de cortes y cavidades es crucial para evaluar la estabilidad mecánica. Los métodos actuales implican medición manual e indirecta, obstaculizando la eficiencia. Este estudio propone un dispositivo de monitoreo continuo utilizando dispositivos piezoeléctricos en modo de matriz de fase, basado en el efecto Doppler. Validado experimentalmente, este modelo mejora la eficiencia operativa y potencia las prácticas de pruebas no destructivas, enfatizando la precisión y el monitoreo en tiempo real para una mejor evaluación de la estabilidad del pozo y análisis geomecánico.

Introducción

Durante la extracción de hidrocarburos, la perforación se realiza desde la superficie hasta la formación productora. A lo largo de este proceso, se aplican estrategias y principios de geomecánica para controlar la estabilidad del pozo a medida que avanza la perforación. Un colapso o derrumbe dentro del pozo puede provocar paros operativos, lo que genera importantes pérdidas de tiempo y recursos.

La estabilidad del pozo se evalúa, entre otros criterios, mediante la monitorización de la cantidad de fragmentos de roca transportados por el lodo a lo largo del tiempo. El flujo volumétrico instantáneo de estos desprendimientos, usualmente expresado en (m^3/s), es un indicador clave del estado mecánico del pozo: aumentos inesperados pueden advertir sobre zonas inestables o eventos de derrumbe, permitiendo la toma de acciones preventivas antes de que se materialicen incidentes más graves. Sin embargo, los sistemas actualmente implementados para estimar el caudal de cortes suelen ser manuales o poco automatizados, lo que puede traducirse en demoras al detectar y responder a cambios de la estabilidad del pozo.

Para avanzar hacia un monitoreo continuo y oportuno, se requiere el desarrollo de tecnologías no invasivas que mejoren la precisión y confiabilidad en la medición del flujo volumétrico de recortes. Estas soluciones deben ser de instalación sencilla, mantenimiento mínimo y capaces de operar en condiciones complejas típicas de la superficie de perforación. En este contexto, las técnicas de ultrasonido han demostrado ser valiosas para la inspección no intrusiva y la medición de flujo en tuberías, incluyendo aquellas que contienen lodo base agua con recortes de roca. [1,2].

Uno de los métodos más utilizados es la técnica Doppler, que estima la velocidad de las partículas sólidas (recortes) midiendo el desplazamiento de frecuencia entre la señal emitida y la recibida. Habitualmente, se emplean transductores piezoeléctricos que pueden ser instalados de manera externa a la tubería, evitando así modificaciones estructurales o interrupciones del flujo.[1]. Con desarrollos recientes, el uso de arreglos tipo "Phased Array" permite direccionar el frente de onda ultrasónica, optimizando la sensibilidad y cobertura en el interior de la tubería. A partir de la velocidad del lodo y los recortes, y la caracterización de la señal Doppler, se puede construir un modelo que relacione el cambio de frecuencia observado con el flujo volumétrico de cortes transportados, considerando el tamaño de los fragmentos y la concentración de sólidos. [1,3].

No obstante, el diseño y la implementación práctica de estos sistemas enfrentan retos técnicos importantes. Por ejemplo, la alta impedancia acústica de las tuberías metálicas produce reflexiones significativas de la onda ultrasónica incidente, lo que puede dificultar la interpretación de las señales reflejadas y disminuir la sensibilidad del sistema en campo. [3,4]. A pesar de estos desafíos, la evidencia experimental obtenida en bancos de pruebas de laboratorio posiciona al ultrasonido Doppler externo como la tecnología actual más avanzada y factible para la estimación instantánea del flujo volumétrico de recortes en superficie. [1,3,5].

Marco teórico

Medición por efecto Doppler

Los medidores por efecto Doppler son especialmente utilizados en fluidos que contienen partículas suspendidas en él. La fuente emite una señal ultrasónica que viaja a través del lodo, cuando la fuente encuentre material rocoso es refractada en todas las direcciones y la roca se convierte en el emisor. Es entonces que el cristal piezoeléctrico receptor observa una señal acústica con una frecuencia diferente a la emitida. [6][7][8]

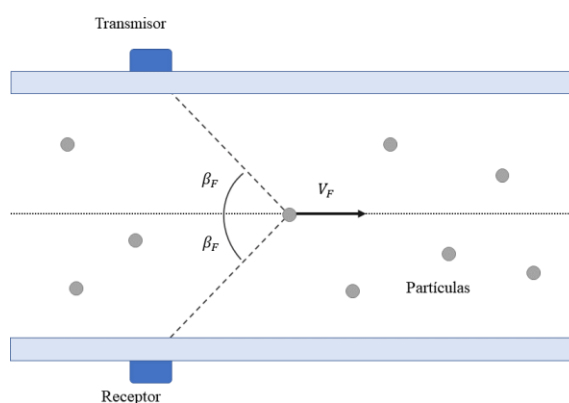


Ilustración 1. Principio de medición de flujo volumétrico Doppler

Considerando la ilustración 2, el eje central de los transductores y el eje de la tubería forma un ángulo β_F donde el flujo se moverá a lo largo de la tubería con una velocidad V_F , si el cristal piezo eléctrico transmisor genera una onda de sonido con una frecuencia f_T la frecuencia adquirida por el cristal receptor f_R de la partícula en movimiento, estará dada por la ecuación 1.

$$f_R \approx f_T \left(1 - \frac{2 V_F \cos \beta_F}{c_F} \right)$$

Ecuación 1

Donde c_F es la velocidad del sonido en el medio de transmisión y la velocidad del flujo por la ecuación 2.

$$V_F = \frac{c_F (f_T - f_R)}{2 \cos \beta_F f_T}$$

Ecuación 2

Principio Phased Array

Un sistema modo phased array (ó arreglo de fase) utiliza el principio de la física de superposición gradual de la onda, variando una serie de pulsos salientes de cada uno de los transductores que lo componen, de tal manera que los frentes de onda generados individualmente por cada elemento de la matriz se combinan entre

sí para añadir o cancelar la energía de forma predecible que orientan y dan forma al haz de sonido con eficacia.

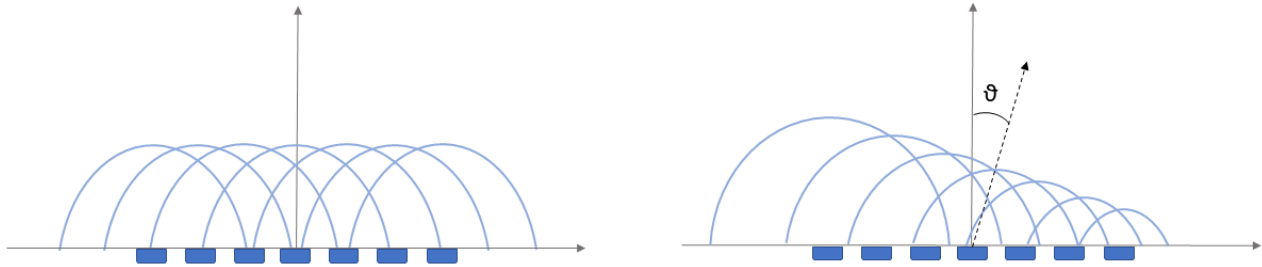


Ilustración 2. Haz de enfoque para incidencia normal y angular

Cada elemento de la matriz compuesta de piezoelectricos se activa en momentos diferentes y Al ser activados con diferente fase crea un haz con un ángulo específico enfocado y con una profundidad específica. [9]

(Ilustración 3). Cuando se tiene un arreglo $1 \times N$ en la matriz modo *phased array*, con un ángulo de incidencia ϑ , el tiempo de fase de cada uno de los actuadores piezoelectricos está dado por la ecuación 3. [10]

$$t_n = n \frac{p}{c} \sin \vartheta + t_n$$

Ecuación 3

N : Es el número total de elementos en el arreglo.

c : Velocidad del sonido en el medio de transmisión.

c : Paso, o distancia de centro a centro entre dos elementos consecutivos.

ϑ : Angulo de incidencia del frente de onda.

Filtro LMS (Least Mean Squares)

El filtro LMS (Least Mean Squares, o "de Mínimos Cuadrados Medios") es un tipo de filtro adaptativo ampliamente utilizado para eliminar ruido o señales no deseadas en sistemas de procesamiento digital. Su funcionamiento se basa en un bucle de retroalimentación: el filtro ajusta automáticamente sus coeficientes en tiempo real para minimizar la diferencia entre una señal deseada y la salida filtrada. Este ajuste se realiza de forma sencilla, mediante una regla de actualización que depende del error instantáneo y de una llamada constante "tamaño de paso" (μ), lo que permite al filtro adaptarse progresivamente al entorno de la señal [11][12][13][14]. Las aplicaciones típicas del filtro LMS incluyen la cancelación de ruido en señales de audio, comunicación y sistemas de control, donde es apreciado por su simplicidad computacional y su fácil implementación en hardware o software digital.[11][13].

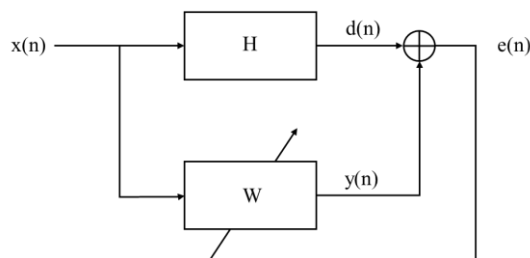


Ilustración 3. Diagrama de bloques del filtro LMS

$x(n)$: Señal de ruido.

$H(z)$: Función de transferencia ruta primaria.

$d(n)$: Señal de ruido primaria de error.

$e(n)$: Señal de error modificada.

$W(z)$: Filtro adaptativo LMS.
 $y(n)$: Salida del filtro adaptativo.

Diseño y validación del sistema de estimación de flujo

El sistema consiste en un tanque inicial que contiene 10 (L) de lodo perforación y rocas en distintas concentraciones. El fluido y las rocas se desplazan a través de una tubería de acero al carbono de 2 (mm) de espesor y 8 (cm) de diámetro, controlada por dos válvulas que regula el flujo. Finalmente, la mezcla de lodo y rocas se deposita en una bandeja de recepción. (Ilustración 4)

Para el arreglo en modo Phased Array, se usan piezoeléctricos flexibles M0714P2, cada uno tiene un tamaño de 7x14 (mm), más un margen de espacio que sirve para la conexión eléctrica de cada uno. Es por esto que se distribuyen sobre un arreglo vectorial, con una separación de 2(cm) entre piezo y piezo.

Para el experimento se usan cuatro diferentes concentraciones de rocas, con el fin de crear el modelo que relaciona la variación de la frecuencia Doppler y las concentraciones de roca. Dichas concentraciones fueron de 42(g), 84(g), 140(g) y 280(g); con tamaños de más de 2 (cm). Las rocas se van ingresando por el tanque superior a medida que va fluyendo el lodo a través de la tubería.

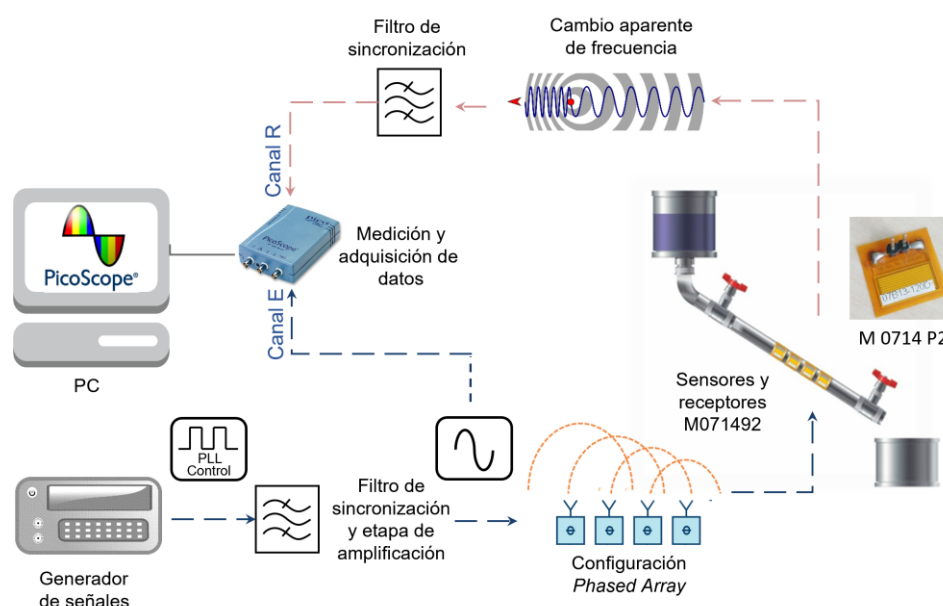


Ilustración 4. Esquema de diseño del experimento

Sincronización del desfase entre piezo-actuadores

Desfasar la señal eléctrica que excita cada uno de los piezo-actuadores para lograr un sistema Phased Array representa un desafío, ya que este tiempo de desfase se encuentra en el orden de los microsegundos, son ondas de alta frecuencia que hace que el periodo de la señal sea corto y que además se desea excitar el piezo con un voltaje que sea eficiente. Es por esto que se decide que la señal a desfasar sean señales cuadradas, para posteriormente amplificarlas con un MOSFET de alta potencia y frecuencia.

Después de caracterizar el sistema entre piezos y la tubería de acero-carbono, haciendo un barrido en frecuencia para determinar la mejor frecuencia de señal de ultrasonido a trabajar y se obtuviera la mejor transmisión de la misma, se determinó que la frecuencia para la emisión de las ondas es de 69 (kHz) con un periodo de 14.49 (μ s). Se calcula los tiempos de desfase de cada uno de los piezos del arreglo vectorial Phased array para tres diferentes ángulos: 30°, 45° y 60°. Posteriormente, se representa la simulación en

Matlab de las 8 ondas emitidas por cada uno de los piezo-actuadores a dicha frecuencia (ilustraciones 5, 6 y 7). Se puede observar que algunas de las señales en el arreglo tienen una diferencia muy pequeña e imperceptible con las de algún otro piezo-eléctrico, es decir en el desfase tienden a coincidir la señal de un piezo con otro. Para no generar 8 señales desfasadas, que es la cantidad de piezos en el arreglo vectorial del phased array se decide omitir las que coinciden.

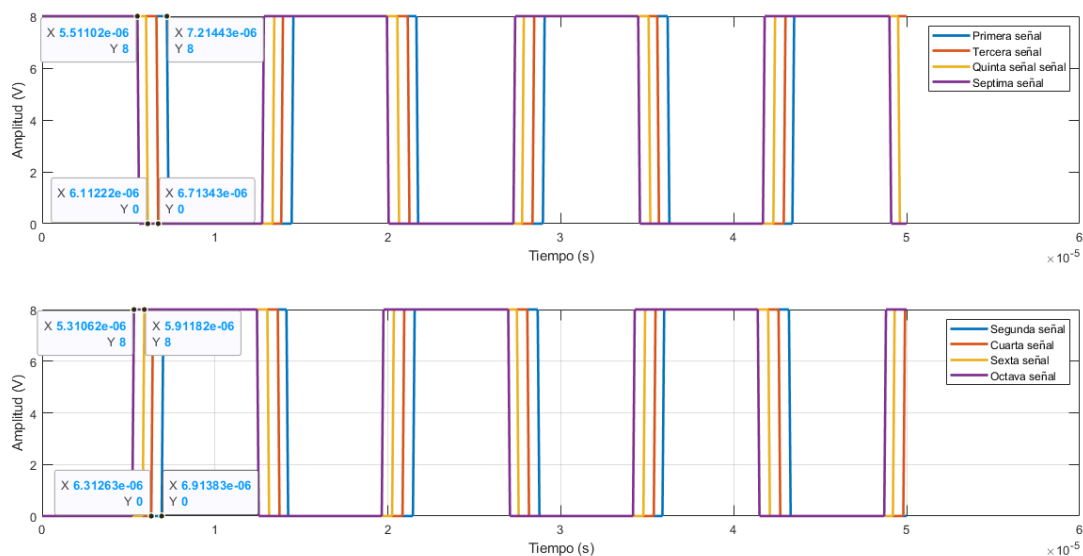


Ilustración 5. Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 30°

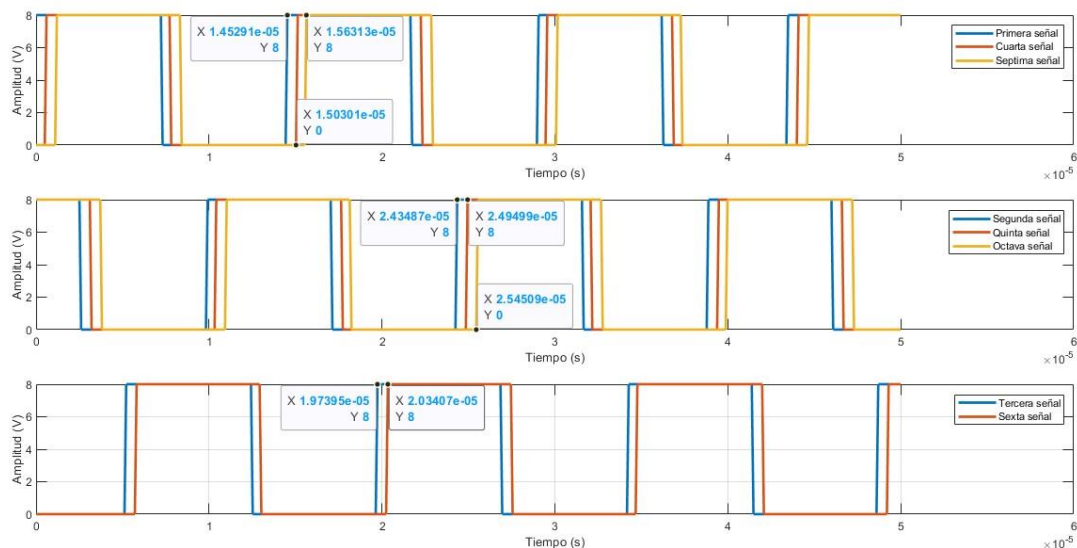


Ilustración 6. Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 45°

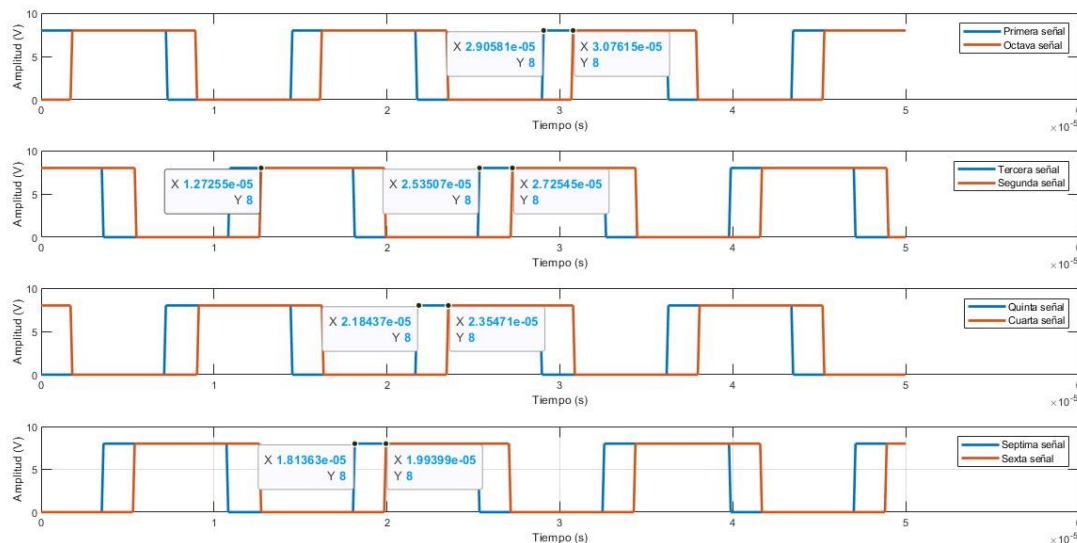


Ilustración 7. Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 60°

Para lograr el desfase de la señal, se emplea un PLL565 (Phase-Locked Loop). Al ajustar la capacitancia del filtro pasa-bajas, específicamente el componente C2 (ilustración 8), se puede observar un desfase en la señal de salida del VCO (Voltage-Controlled Oscillator) con respecto a la señal de entrada.

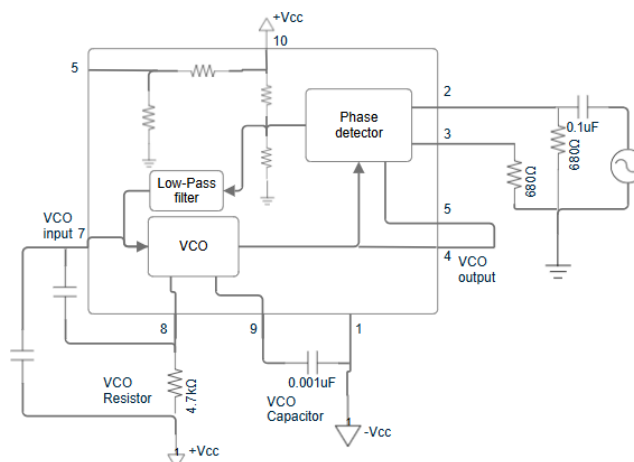


Ilustración 8. Esquema eléctrico del PLL565

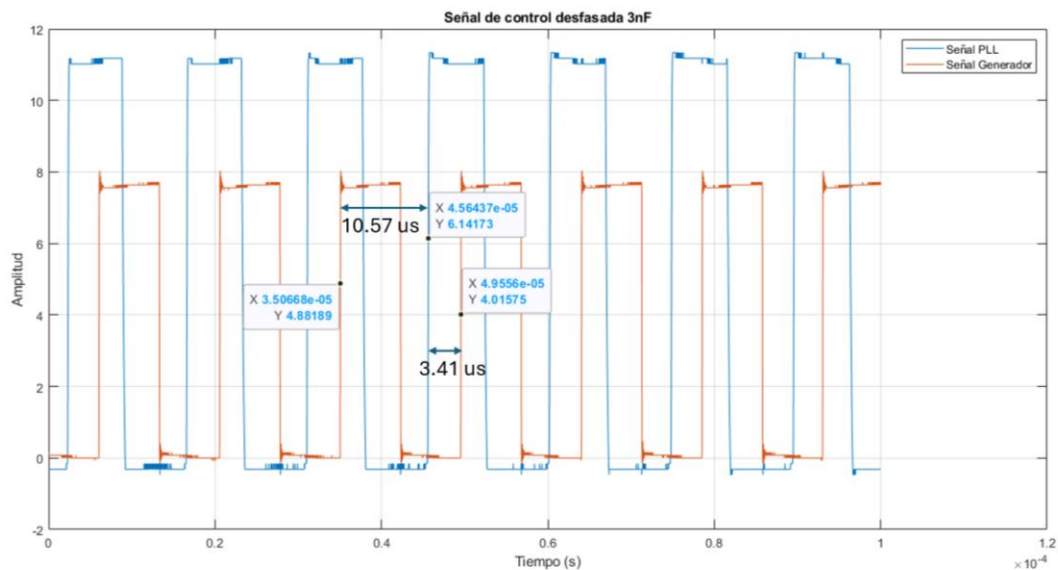


Ilustración 9. Desfase con $C2=3(nF)$

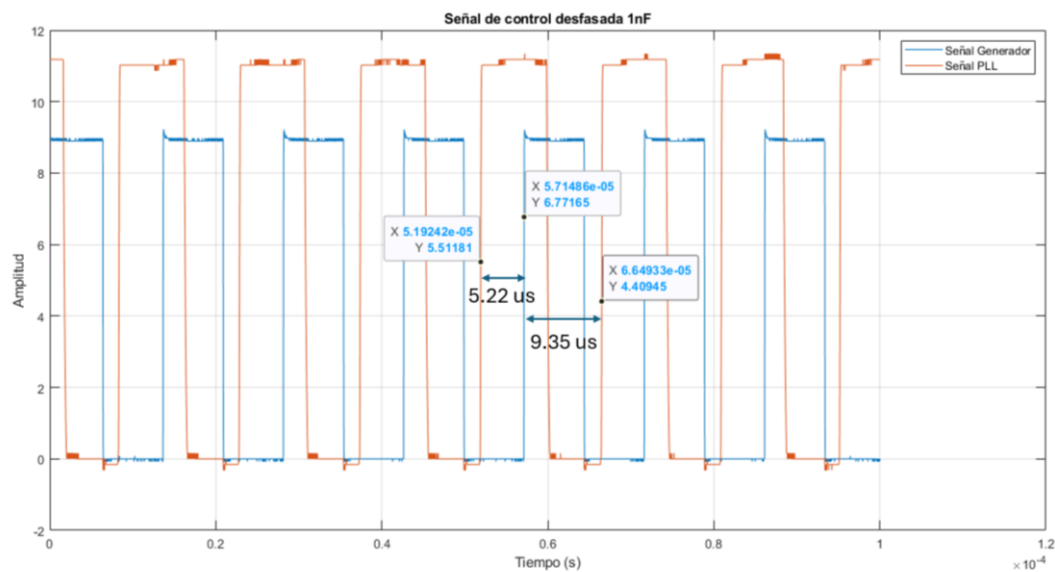


Ilustración 10. Desfase con $C2=1nF$

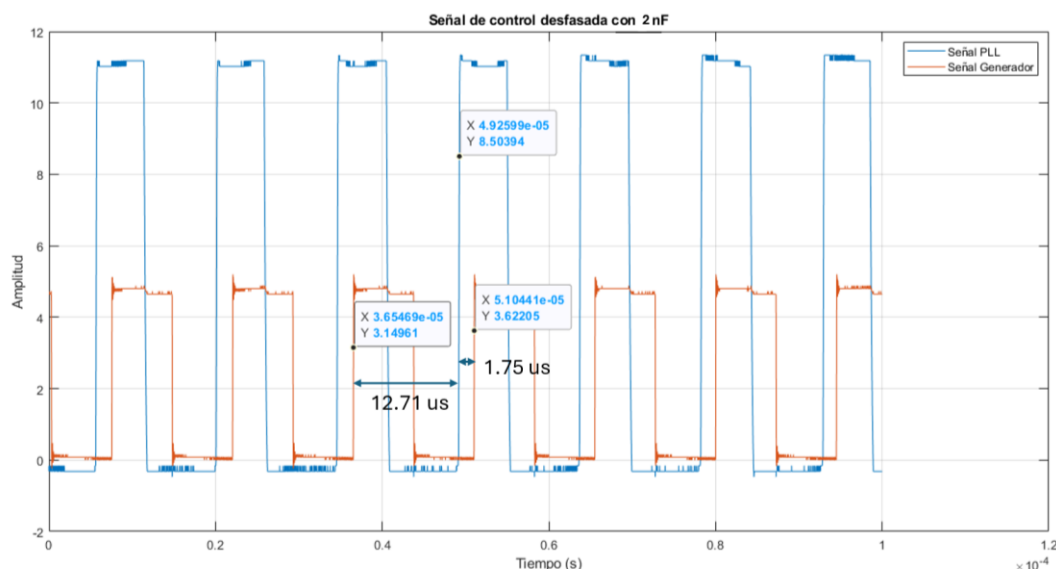


Ilustración 11. Desfase con C2=2nF

Con $C2=3\text{nF}$ (ver figura 9), se observa un desfase de $3.4\text{ }(\mu\text{s})$, aproximadamente la mitad del desfase requerido para una señal de 30° ($6.96\text{ }(\mu\text{s})$). Por lo tanto, se requieren dos etapas de PLL en serie para alcanzar el desfase deseado. Con $C2=1\text{nF}$ (ver figura 10), se obtiene un desfase de $9.35\text{ }(\mu\text{s})$, que se aproxima al desfase de 45° ($9.85\text{ }(\mu\text{s})$). Para $C2=2\text{ nF}$, el desfase de la señal en el PLL es de $12.71\text{ }(\mu\text{s})$, lo que se aproxima al desfase de 60° ($12.07\text{ }(\mu\text{s})$). Estas señales son medidas en el Pin 2 del PLL y la señal desfasada en el Pin 4 del IC565.

Etapas de amplificación

Una vez desfasadas las señales con los PLL pasan por una etapa de amplificación. El circuito implementado es un excitador para el transductor piezoeléctrico (MFC0714) que amplifica una señal de control y generar las vibraciones mecánicas. (Ilustración 12). La señal de entrada activa el transistor 2N3904, que controla la compuerta del MOSFET IRF530, permitiendo el paso de corriente desde una fuente de $+48\text{V}$ hacia el transductor. Un divisor resistivo ayuda a ajustar y estabilizar la señal aplicada al transductor ya que el transductor se comporta como una carga capacitiva. El IRF530 tiene características necesarias para hacer una amplificación alta potencia y de alta frecuencia.

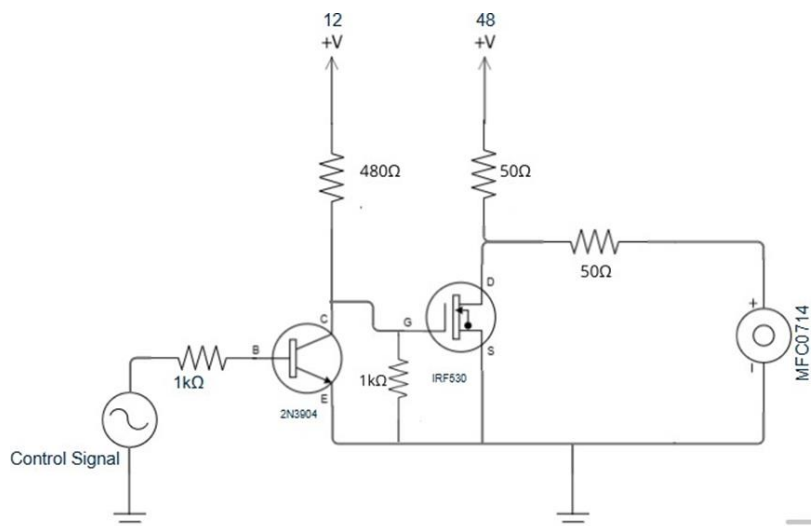


Ilustración 12. Circuito de amplificación de la señal de control

En la ilustración 13 se pueden observar dos señales. La señal azul corresponde a la señal de control, que tiene una frecuencia de 69 kHz, una amplitud de 5 Vpp y un ciclo de trabajo del 50 %. La señal roja, medida desde el canal B, es una señal amplificada con la misma frecuencia de 69 kHz, pero con una amplitud de 83.46 Vpp. Es importante destacar que el canal B está configurado con un factor de multiplicación de $\times 10$, ya que se utiliza una sonda de $\times 10$ en el osciloscopio. Esto es necesario debido a que el límite de voltaje medible por el osciloscopio es de ± 20 V.

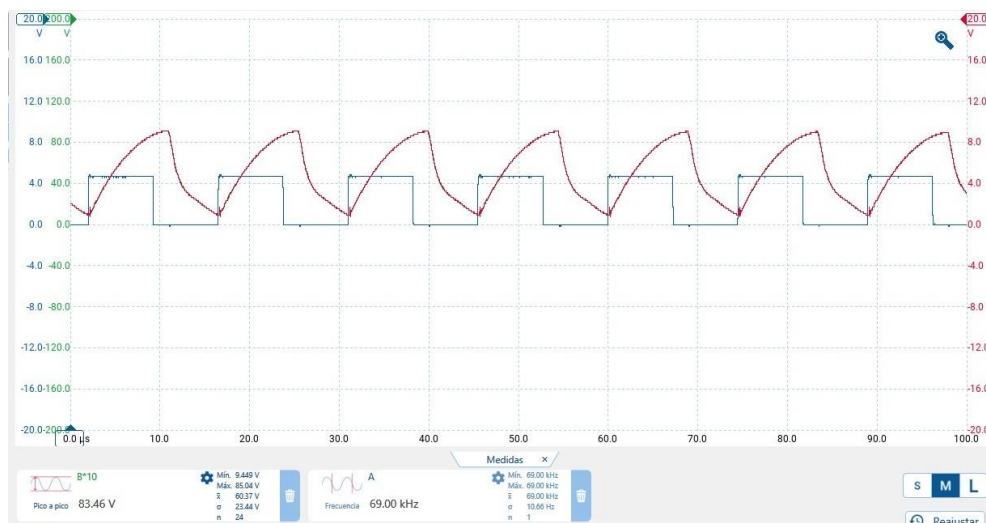


Ilustración 13. Señal de control y amplificada medida por el picoscope

A continuación, se pueden observar dos señales amplificadas: El canal A (azul) que corresponden a la primera señal enviada y el canal B a la segunda señal desfasada. Alcanzando un voltaje de 67.72Vpp y 61.42Vpp respectivamente. (Ilustración 14)

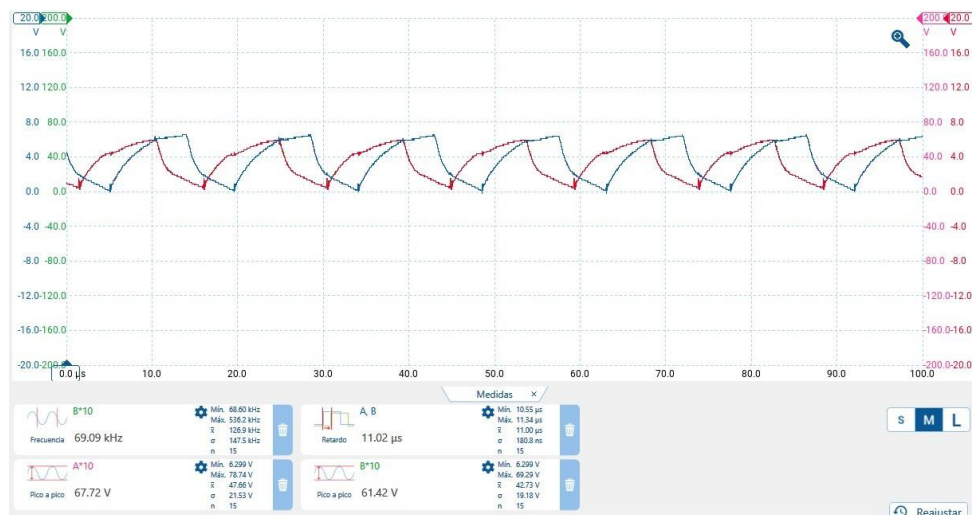


Ilustración 14. Señales amplificadas con desfase medidas por el picoscope

Resultados

Comprobación del sistema Phased Array

Para verificar la inclinación del frente de onda, se posiciona un sensor en el lado opuesto al arreglo vectorial. La distancia desde el eje central del arreglo hasta la apertura del ángulo se calcula aplicando la ley de los senos. El análisis del frente de onda se realiza para tres ángulos de inclinación: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$ y $\theta_1 = 60^\circ$.

Para cada ángulo, se colocan sensores en las posiciones correspondientes a la apertura angular y un sensor adicional en el punto medio entre dichas aperturas. En total, se registran mediciones de voltaje en seis posiciones distintas respecto al eje central del arreglo, lo que permite caracterizar la forma y orientación del frente de onda con mayor precisión.

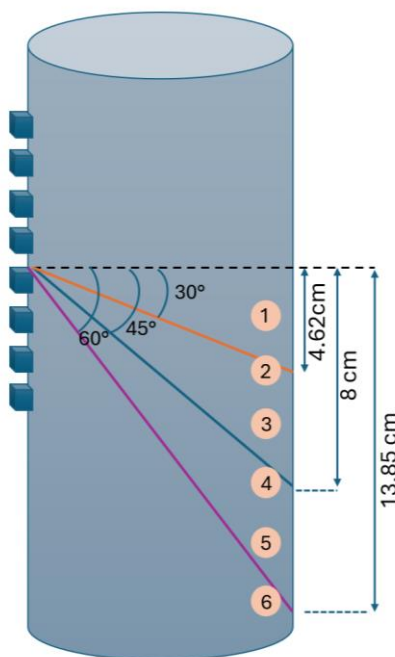


Ilustración 15. Posiciones de los sensores sobre la tubería para corroborar el ángulo de incidencia del arreglo vectorial de piezos del sistema Phased Array

A continuación, se activa el arreglo vectorial con sus respectivos desfases, operando a una frecuencia de 69 (kHz). Mediante el uso de un Picoscope, se analizan las señales en el dominio la frecuencia. Para este análisis, se registra el valor de la amplitud correspondiente al pico máximo en el espectro de la señal detectada por el sensor en las distintas posiciones respecto al eje central del arreglo. La posición 2 coincide con la distancia de apertura del ángulo de 30°, la posición 4 con la de 45°, y la posición 6 con la de 60°, según se presenta en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Valores de la amplitud del pico en frecuencia medido en las diferentes posiciones del sensor para un ángulo de incidencia para 30°

Posición	Prueba 1 (dBu)	Prueba 2 (dBu)	Prueba 3 (dBu)	Prueba 4 (dBu)	Prueba 5 (dBu)	Promedio (dBu)
1	-15,09	-14,91	-15,36	-14,91	-14,96	-15,05
2	-14,43	-14,49	-14,68	-14,60	-14,57	-14,55
3	-15,25	-15,46	-15,32	-15,26	-15,42	-15,34
4	-15,12	-15,62	-15,36	-15,28	-15,36	-15,35
5	-15,90	-15,89	-15,84	-15,85	-16,00	-15,90
6	-15,20	-15,17	-15,24	-15,22	-15,49	-15,26

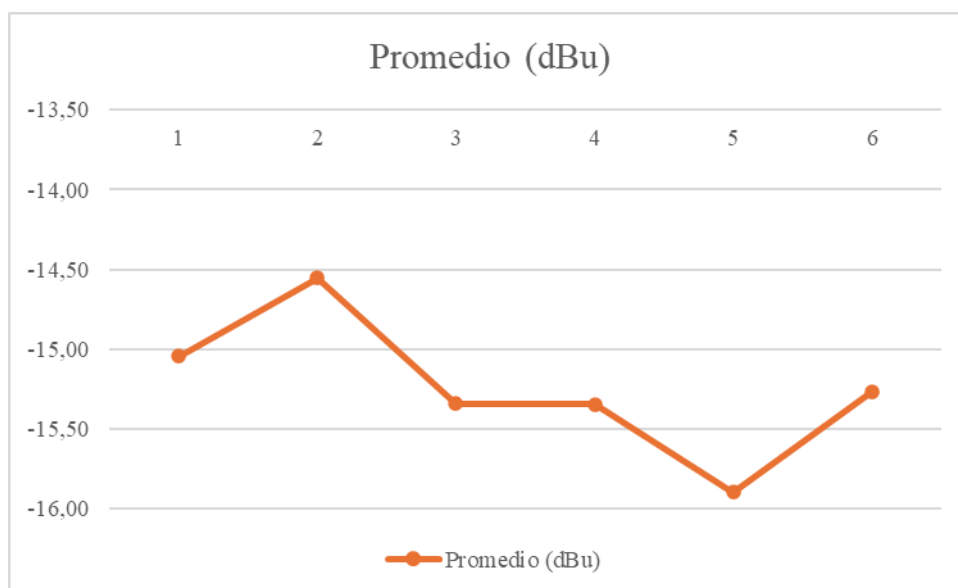


Ilustración 16. Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de 30°

Tabla 2. . Valores de la amplitud del pico en frecuencia medido en las diferentes posiciones del sensor para un ángulo de incidencia para 45°

Posición	Prueba 1 (dBu)	Prueba 2 (dBu)	Prueba 3 (dBu)	Prueba 4 (dBu)	Prueba 5 (dBu)	Promedio (dBu)
1	-15,29	-15,5	-15,83	-16,16	-15,97	-15,75
2	-15,99	-15,9	-15,73	-15,63	-15,85	-15,82
3	-16,05	-16,24	-16,05	-14,44	-14,77	-15,51
4	-14,53	-14,47	-14,55	-14,28	-14,23	-14,412
5	-15,97	-15,72	-15,61	-15,47	-15,61	-15,676
6	-15,66	-16,05	-16,45	-16,35	-15,99	-16,1

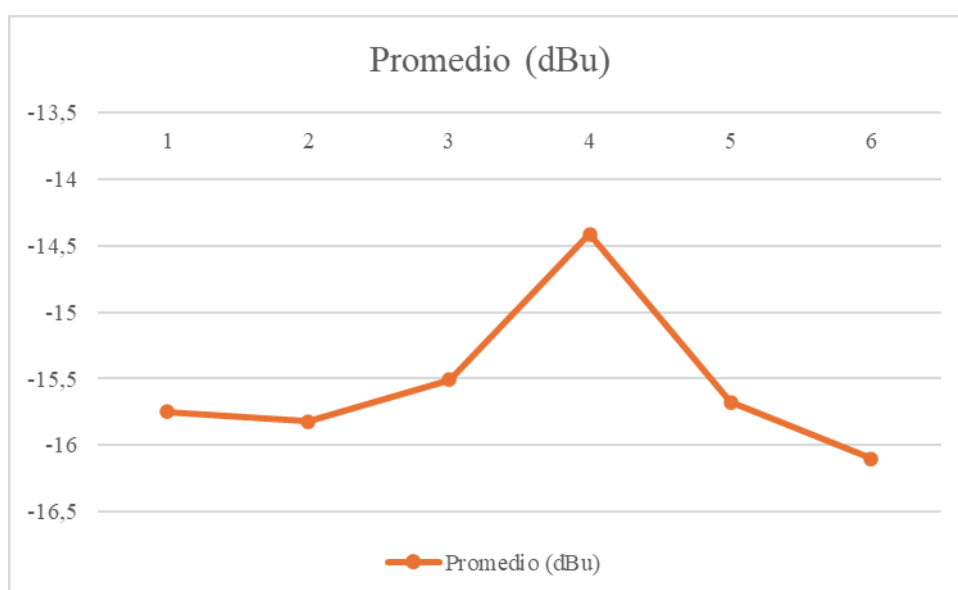


Ilustración 17. Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de 45°

Tabla 3. Valores de la amplitud del pico en frecuencia medido en las diferentes posiciones del sensor para un ángulo de incidencia para 60°

Posición	Prueba 1 (dBu)	Prueba 2 (dBu)	Prueba 3 (dBu)	Prueba 4 (dBu)	Prueba 5 (dBu)	Promedio (dBu)
1	-15,62	-15,43	-15,75	-15,50	-15,45	-15,55
2	-15,21	-14,10	-15,30	-14,25	-15,15	-14,80
3	-14,93	-15,08	-14,83	-14,85	-14,95	-14,93
4	-14,64	-14,58	-14,72	-14,61	-14,56	-14,62
5	-14,37	-13,41	-14,35	-14,22	-13,89	-14,05
6	-13,50	-13,62	-14,06	-13,89	-14,11	-13,84

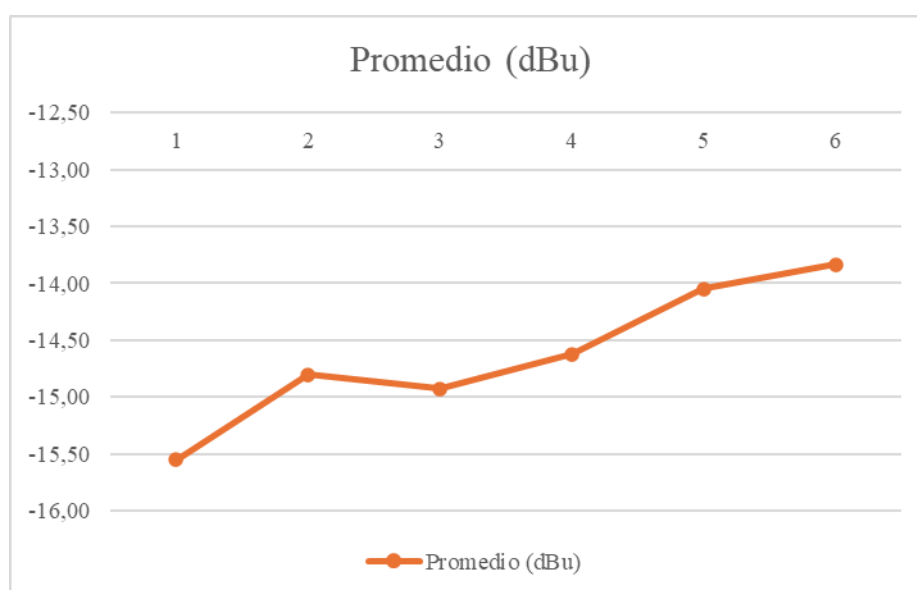


Ilustración 18. . Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de 60°

Cuando el arreglo Phased Array se configura para emitir el frente de onda a un ángulo de 30°, se observa en la Ilustración 16 una variación en la amplitud de la señal, siendo mayor en la posición 2, que corresponde a la distancia asociada con la apertura angular de 30°. Este mismo comportamiento se repite en las Ilustraciones 17 y 18 para los ángulos de 45° y 60°, donde se registra una mayor intensidad de señal en las posiciones 4 y 6, respectivamente, coincidiendo con las distancias de apertura correspondientes a dichos ángulos.

Validación modelo experimental para la estimación

En esta etapa del experimento, el tanque superior se llena con aproximadamente 10(L) de lodo, que posteriormente se deja fluir a través de la tubera al abrir la válvula a 1/4 de su apertura total. El lodo pasa por una sección transversal del tubo de 0.00023 (m²). El procedimiento se repite 3 veces para calcular la velocidad del solo lodo y para cada una de las concentraciones de roca propuestas para el experimento.

Tabla 4. Caudal y velocidad del lodo a partir del tiempo de vaciado el tanque.

Datos adquiridos		Datos calculados		
Prueba	Volumen (m3)	Tiempo (s)	Caudal	Velocidad
1	0,01	20,78	0,0004813	2,0927
2	0,01	21,03	0,0004756	2,0678
3	0,01	20,15	0,0004963	2,1583

Para comparar los valores estimados con la frecuencia Doppler, se calcula la velocidad del lodo midiendo con un cronómetro el tiempo en el que dura en caer los 10(L) de lodo y rocas desde el tanque superior al tanque inferior abierta la válvula a 1/4. Mientras el lodo cae, se van introduciendo las rocas con las concentraciones respectivas medidas previamente. Primero se hace este proceso solo con el lodo y la velocidad del lodo en cada prueba se puede observar en la tabla 4.

Con ayuda del Picoscope se miden señales en el tiempo dentro de una ventana de 10(ms) y en frecuencia de en una ventana de 0 a 992.1 (kHz) con una velocidad de las muestras de 1,98 (MS/s). Estas capturas se toman periódicamente durante toda la prueba; mientras la válvula está cerrada y luego abierta hasta desocupar todo el lodo y las rocas que hay en el tanque superior. Cabe destacar que las pruebas están hechas para un ángulo de incidencia de 45°.

Para obtener la frecuencia Doppler, no es posible identificarla directamente como el pico más alto en el espectro de la señal recibida en comparación con la señal emitida por el sensor. Tal como se mencionó anteriormente, uno de los principales desafíos radica en que la señal transmitida tiende a propagarse a través de la tubería de acero-carbono, debido a sus propiedades acústicas. Como resultado, el sensor detecta no solo la señal Doppler refractada por las partículas en movimiento, sino también la onda que se propaga estructuralmente a lo largo de la tubería. Dado que la frecuencia de transmisión es de 69 kHz, la frecuencia Doppler esperada tiene un desplazamiento muy pequeño, del orden de los 100 Hz (Valor estimado por el tiempo en el que tarda en vaciarse los 10(L) de lodo con las rocas desde el tanque superior), lo que dificulta su distinción. Esta señal Doppler es fácilmente enmascarada por la interferencia de mayor amplitud originada por la propagación estructural.

Ante esta limitación, se implementa un filtro adaptativo del tipo LMS (Least Mean Squares), el cual permite suprimir la señal estructural que recorre la tubería y revelar la señal Doppler asociada al movimiento de las rocas. Para ello, se utiliza como señal de referencia la medición obtenida por un sensor adicional instalado inmediatamente después del arreglo vectorial de transductores piezoeléctricos. Tras aplicar el filtrado, se obtiene un espectro donde el pico de mayor amplitud corresponde efectivamente a la frecuencia Doppler, distinta de la señal original enviada como se puede observar en la Ilustración 19. Este procedimiento se repite varias veces para las diferentes concentraciones de rocas en el lodo, calculando las frecuencias Doppler correspondientes mediante procesamiento en MATLAB. Las frecuencias obtenidas se reportan en la tabla 5.

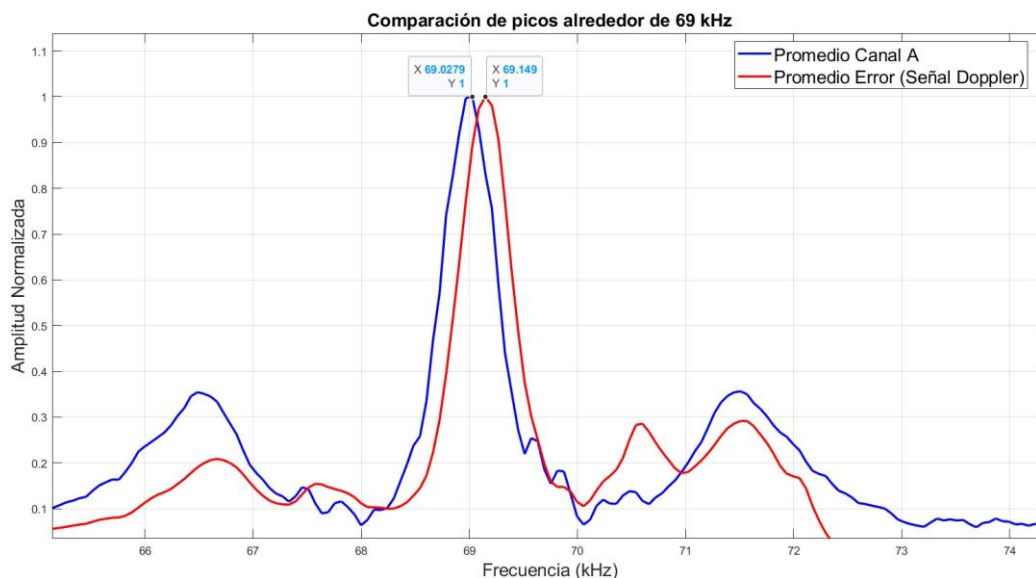


Ilustración 19. Desfase de la señal en frecuencia después de aplicarle el filtro LMS

Tabla 5. Frecuencias Doppler obtenidas después del filtro LMS

Número de prueba	Concentración (%)	Masa (g)	Frecuencia en el pico (Hz)	Delta de Frecuencia-Media (Hz)	Promedio de frecuencia en el pico (Hz)	Desviación (Hz)
Prueba 1	0.411	42	69168	167	69151	11.25
Prueba 2			69152	151		
Prueba 3			69180	179		
Prueba 1	0.818	84	69151	150	69166	10.16
Prueba 2			69150	149		
Prueba 3			69172	171		
Prueba 1	1.356	140	69263	262	69195	29.46
Prueba 2			69231	230		
Prueba 3			69191	190		
Prueba 1	2.676	280	69142	141	69143	1.24
Prueba 2			69144	143		
Prueba 3			69145	144		

Una vez obtenidas las frecuencias Doppler, se calcula el desplazamiento de frecuencia (delta f) restando cada una de ellas de la frecuencia pico de la señal emitida. A partir de este valor y mediante la Ecuación 2, se determina la velocidad media del flujo y, con base en dicha velocidad, se estima el caudal promedio para cada prueba, correspondiente a las diferentes concentraciones de roca en el lodo. (Ver Tabla 6).

Adicionalmente, se calcula la velocidad y el caudal a partir del tiempo de vaciado del tanque en cada prueba, con el fin de comparar ambos métodos de estimación. La tabla también presenta el porcentaje de error relativo entre los resultados obtenidos por el método Doppler y aquellos derivados del vaciado temporal, lo cual permite evaluar la precisión del enfoque no invasivo basado en el análisis espectral.

Tabla 6. Velocidad y flujo volumétrico a partir del delta de frecuencia

Concentración (%)	Masa (g)	Calculados con la frecuencia Doppler			Calculados con el tiempo de vaciado			Error %
		Delta de frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Caudal (m³/s)	Tiempo de vaciado (s)	Velocidad (m/s)	Caudal (m³/s)	
0.411	42	167	2,7450324	0,00063136	19,29	2,25392747	0,0005184	21,788852
		151	2,48203528	0,00057087	19,14	2,27159148	0,00052247	9,2641571
		179	2,94228023	0,00067672	19,57	2,22167915	0,00051099	32,434976
0.818	84	150	2,46559796	0,00056709	22,37	1,94359682	0,00044703	26,857481
		149	2,44916064	0,00056331	22,93	1,98259284	0,0004560	23,533214
		171	2,81078167	0,00064648	18,84	2,30776332	0,00053079	21,796791
1.356	140	262	4,30657777	0,00099051	22,02	1,97448959	0,00045413	118,11094
		230	3,78058354	0,00086953	26,73	1,62657168	0,00037411	132,4265
		190	3,12309075	0,00071831	20,85	2,08528829	0,00047962	49,767817
2.676	280	141	2,31766208	0,00053306	19,87	2,18813593	0,00050327	5,9194748
		143	2,35053672	0,00054062	22,00	1,97628459	0,00045455	18,937158
		144	2,36697404	0,0005444	20,94	2,07632573	0,00047756	13,998204

Ya obtenidos los valores de delta de frecuencia, se realiza un ajuste de curvas con el fin de desarrollar un modelo matemático capaz de estimar la masa de roca transportada. La ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales corresponde a un polinomio de cuarto grado, con un coeficiente de determinación R^2 de: 0.8648, lo cual indica una buena correlación entre los valores observados y el modelo propuesto. El resultado del ajuste queda expresado en la siguiente ecuación:

$$Masa = 5.0573 \times 10^{-5} \cdot x^4 - 0.0418 \cdot x^3 + 12.7907 \cdot x^2 - 1711.3853 \cdot x + 84606.4493$$

Ecuación 4. Ecuación del modelo de estimación

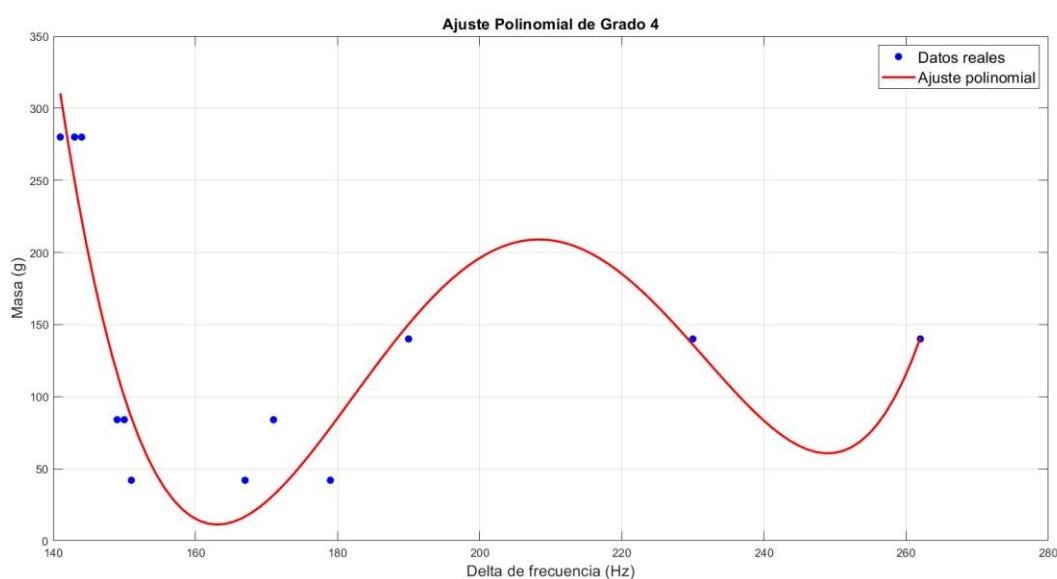


Ilustración 20. Modelo de estimación de masa en función de la frecuencia

Tabla 7. Evaluación del modelo de estimación a partir de la frecuencia Doppler

Frecuencia (Hz)	Masa Real (g)	Masa Modelada (g)	Promedio (g)	Error Absoluto (g)	Error Relativo (%)	Desviación Estándar (g)
69168,00	42,00	16,75	60,17	25,25	60,12	30,86
69152,00	42,00	85,75		43,75	104,17	
69180,00	42,00	78,00		36,00	85,71	
69151,00	84,00	100,00	82,67	16,00	19,05	36,42
69150,00	84,00	116,00		32,00	38,10	
69172,00	84,00	32,00		52,00	61,90	
69263,00	140,00	140,75	142,17	0,75	0,54	6,10
69231,00	140,00	135,50		4,50	3,21	
69191,00	140,00	150,25		10,25	7,32	
69142,00	280,00	310,75	260,92	30,75	10,98	37,05
69144,00	280,00	250,00		30,00	10,71	
69145,00	280,00	222,00		58,00	20,71	

A partir de la tabla 7 se puede determinar que el modelo de estimación de masa basado en frecuencias Doppler muestra un buen desempeño general, especialmente en rangos de masas medias y altas, donde los errores absolutos y relativos son bajos y la desviación estándar es menor. Sin embargo, el modelo presenta limitaciones en la estimación de masas bajas, con errores significativos y alta variabilidad. Esto podría atribuirse a la sensibilidad del sistema o a la influencia de ruido en las mediciones.

Tabla 8. Relación de la masa real con los datos estimados

Datos Ingresados		Datos estimados		% Error
Concentración (%)	Masa (g)	Concentración (%)	Masa (g)	
0,411	42	0,591	60,167	43,796
0,818	84	0,811	82,667	0,856
1	140	1,395	142,167	2,876
0,818	280	2,562	260,917	4,260

En cuanto a la masa, el modelo muestra un comportamiento variable dependiendo del rango analizado. Para masas bajas (42 g), la estimación del modelo es significativamente mayor (60.167 g), lo que genera un porcentaje de error elevado (43.796%). En masas medias (84 g), la estimación es mucho más precisa (82.667 g), con un porcentaje de error bajo (0.856%). Para masas altas (140 g) y 280 g), el modelo mantiene un desempeño aceptable, con estimaciones de 142.167 g) y 260.917 g), y errores relativos de 2.876% y 4.260%, respectivamente. Esto refleja una variabilidad en el desempeño del modelo dependiendo del rango de masa analizado.

Conclusiones

El estudio demostró que es técnicamente viable estimar el flujo volumétrico de cortes en lodo de perforación mediante técnicas acústicas basadas en el efecto Doppler, utilizando arreglos piezoeléctricos en modo Phased Array. Este enfoque permitió direccionar el frente de onda ultrasónica con precisión, facilitando la detección de señales Doppler asociadas al movimiento de partículas sólidas en el lodo.

Las pruebas realizadas con sensores ubicados estratégicamente alrededor de la tubería confirmaron que el sistema Phased Array logró orientar eficazmente el frente de onda ultrasónica en los ángulos programados

(30°, 45° y 60°). En cada caso, se registraron los máximos de amplitud en las posiciones correspondientes a dichos ángulos, lo cual valida tanto el cálculo teórico de los desfases como la correcta implementación del control de fase en el arreglo piezoeléctrico.

La aplicación del filtro adaptativo LMS fue fundamental para eliminar las interferencias generadas por la propagación estructural del ultrasonido a través de la tubería de acero-carbono, las cuales enmascaraban la señal Doppler proveniente del movimiento de los recortes. Al utilizar una señal de referencia capturada por un sensor adicional, el filtro permitió extraer de forma efectiva la componente Doppler, facilitando la identificación precisa de la frecuencia desplazada.

En el rango de masas medias, alrededor de los 84 (g), se evidencia una mejora en la precisión del modelo, con errores absolutos que varían entre 16.00 (g) y 52.00 (g), y errores relativos que oscilan entre el 19.05% y el 61.90%. Aunque el desempeño es más consistente en comparación con las masas bajas, aún se observan discrepancias significativas, lo que refleja una precisión moderada del modelo en este intervalo.

Para las masas altas, particularmente en 140 (g), el modelo muestra un desempeño más preciso, con errores absolutos bajos de 0.75 (g), 4.50 (g) y 10.25 (g), correspondientes a errores relativos de 0.54%, 3.21% y 7.32%. Esto evidencia una alta capacidad del modelo para estimar masas en este rango con una variabilidad mínima. Sin embargo, en el rango más alto, correspondiente a 280 (g), aunque el desempeño sigue siendo aceptable, los errores absolutos aumentan a 30.75 (g), 30.00 (g) y 58.00 (g), con errores relativos del 10.98%, 10.71% y 20.71%, lo que indica una ligera disminución en la precisión del modelo para valores extremos.

El modelo presenta un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8648$), lo que sugiere que explica el 86% de la variabilidad en las masas reales a partir de las frecuencias Doppler. Este resultado refleja un buen ajuste general del modelo, aunque los datos evidencian que su desempeño es más confiable en rangos de masas medias y altas, mientras que en las masas bajas se presentan mayores errores y variabilidad en las estimaciones.

Al comparar el modelo Doppler con las mediciones por tiempo de vaciado del tanque, se observaron diferencias aceptables en la mayoría de los casos, lo que valida la utilidad del método Doppler como alternativa no invasiva y automatizable frente a métodos manuales.

La tecnología propuesta cumple con los criterios mencionados en la introducción: es no invasiva, adaptable a condiciones reales de perforación, permite monitoreo en tiempo real y mejora la capacidad de detección temprana de inestabilidades geomecánicas en el pozo.

Bibliografía

- [1] Carvajal-Jiménez, J.-M. (2018). *Estimation of Caving volumetric-flow using the ultrasonic Doppler method*. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro.
- [2] Zhou, Q., & Zhang, H. (2017). *Research on Mud Flow Rate Measurement Method Based on Continuous Doppler Ultrasonic Wave*. International Journal of Optics.
- [3] Zharnikov, T., & Katterbauer, K. (2024). *Simulation of ultrasonic Doppler System for Drilling mud Flow Measurements*. Presentado el Día 2, martes 13 de febrero de 2024.
- [4] Olsvik, K., & Kjøsnæs, I. (2019). *Disruptive Clamp-On Technology Tested for Mud Measurement*. Presentado el Día 1, martes 14 de mayo de 2019.
- [5] Tan, C., & Takeda, Y. (2021). *Ultrasonic Doppler Technique for Application to Multiphase Flows: A Review*. International Journal of Multiphase Flow.

- [6] Rupitsch, S. J. (2019). *Piezoelectric Sensors and Actuators*. Recuperado de <https://doi.org/978-3-662-57534-5>.
- [7] Takeda, Y. (2012). *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*. En *Fluid Mechanics and its Applications*. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54026-7>.
- [8] Rueda, J., & Caez, J. (2019). *Metodología para la Inspección y Detección de Fallas en Placas Grandes de Acero (Acero 1020 y Acero Inoxidable Serie 300 AISI), Mediante el Uso de la Técnica de Ultrasonido Phased Array*
- [9] Tripler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics For Scientists and Engineers (Sixth Edition)*.
- [10] Gommlich, A., & Schubert, F. (2016). *On Determination of Focal Laws for Linear Phased Array Probes as to the Active and Passive Element Size*. Recuperado de <http://ndt.net/?id=19763>.
- [11] Soria-Olivas, E., & Martín-Guerrero, J. (2004). *A novel approach to introducing adaptive filters based on the LMS algorithm and its variants*. IEEE Transactions on Education.
- [12] Jain, D. (2022). *A Novel LMS Algorithm Applied to Adaptive Noise Cancellation with Varying Parameters*. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.
- [13] Clarkson, P. (1993). *Optimal and Adaptive Signal Processing*. Unknown journal.
- [14] Ravinchandra, K. A., & Lau Chee Yong. (2019). *Active Noise Reduction using LMS and FxLMS Algorithms*. Journal of Physics: Conference Series.

Autores

Leidy Lorena Arias Cabeza es ingeniera electrónica y estudiante de maestría en ingeniería electrónica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Adscrita desde el 2017 al Grupo de Investigación CEMOS. Donde se ha desarrollado en investigaciones en el área de control predictivo en sistemas biomédicos y en el diseño de un sistema de estimación de flujo volumétrico de rocas en el proceso de perforación de pozos para el Instituto Colombiano de petróleo (ICP).

Rodolfo Villamizar Mejía es un destacado académico e investigador colombiano vinculado a la Universidad Industrial de Santander (UIS), donde ejerce como Profesor Titular en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Actualmente, coordina el programa de Ingeniería Electrónica y forma parte del Grupo de Investigación CEMOS, especializado en control, electrónica, modelado y simulación.

Ana Beatriz Ramírez Silva es profesora de planta en la Universidad Industrial de Santander (UIS), adscrita a la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Actualmente, se desempeña como directora de Investigación y Extensión de dicha facultad. La profesora Ramírez Silva está vinculada al Grupo de Investigación en Conectividad y Procesamiento de Señales (CPS) de la UIS. Sus principales áreas de investigación incluyen: Procesamiento de señales sísmicas y geofísicas, inversión de datos geofísicos utilizando técnicas de optimización global y local, modelado y simulación de la propagación de ondas elásticas en medios heterogéneos y aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la mejora de la calidad de datos sísmicos.

Jenny Mabel Carvajal Jiménez es una ingeniera de petróleos colombiana con una destacada trayectoria en el ámbito de la geomecánica aplicada a la industria de hidrocarburos. Actualmente, se desempeña como profesional de investigación en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) de Ecopetrol S.A., donde lidera actividades experimentales en el área de Mecánica de Rocas. Su experiencia se centra en: Modelamiento geomecánico de pozos exploratorios, estabilidad de pozos durante operaciones de perforación,



caracterización mecánica de rocas bajo condiciones de yacimiento y aplicación de inteligencia artificial en la estimación de propiedades mecánicas de rocas y desarrollo de técnicas acústicas para monitoreo en tiempo real de la estabilidad del pozo.