

Estimación de Flujo Volumétrico de Cortes y Derrumbes de Perforación, Usando Técnicas

Acústicas

Leidy Lorena Arias Cabeza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Electrónica

Director

Rodolfo Villamizar Mejía PhD,

Codirector

Ana Beatriz Ramírez Silva PhD,

Jenny Mabel Carvajal Jiménez MSc,



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

## **Dedicatoria**

A mi hijo Juan José, quien ha sido mi mayor motivo e inspiración.

Y a ti nona Edilia que en el cielo estás.

## **Agradecimientos**

Agradezco en primer lugar a Dios, quien ha guiado mis pasos y me ha brindado la fortaleza para llegar hasta aquí. A mi esposo Juan Linares, por su constante motivación y apoyo incondicional en todo momento. A mi hijo Juan José, mi mayor inspiración y motor para seguir adelante. También extendo mi gratitud a mis padres y a todos mis familiares, quienes han apoyado cada uno de mis proyectos con su cariño y respaldo.

De igual forma, agradezco profundamente al profesor Rodolfo Villamizar, por su dedicación y guía durante el desarrollo de este proyecto. Un especial reconocimiento para mis codirectoras, la ingeniera Jenny Carvajal y la profesora Ana Ramírez, por su valiosa colaboración y compromiso que hicieron posible la realización de este trabajo.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	17
1. Planteamiento del problema.....	20
1.1 Propuesta de investigación.....	22
1.2 Objetivo General.....	23
1.3 Objetivos Específicos.....	23
1.4 Producción Académica .....	24
1.4.1 Conferencias internacionales .....	24
1.4.2 Proyectos de pregrado.....	24
2. Marco Conceptual.....	25
2.1 Sistema de perforación.....	25
2.1.2 Lodo de perforación.....	27
2.2 Principio de transmisión de ondas ultrasónicas .....	28
2.2.1 Medición por efecto Doppler.....	28
2.2.2 Reflexión y refracción del sonido .....	30
2.3 Phased Array.....	32
2.4 Phased-Locked Loop (PLL) .....	34
2.4.1 Comportamiento dinámico del PLL.....	35
2.4.2 PLL IC 565 .....	36
2.5 Filtro LMS (Least Mean Squares) .....	38
3. Generación de frente de onda en Modo Phased Array .....	41
3.1 Configuraciones del modo Phased Array .....	41

3.2 Secuencia de disparo para formar el frente de onda .....	46
3.3 Caracterización de los piezo-actuadores .....	47
3.4 Configuración experimental de los piezoeléctricos para modo <i>Phased Array</i> .....	49
3.5 Obtención de la respuesta en frecuencia de los piezoeléctricos .....	50
3.6 Optimización de la generación de señales de excitación .....	52
3.7 Configuración electrónica de las Secuencias de Activación de los piezoeléctricos para generar el modo <i>Phased Array</i> .....	54
3.8 Amplificación de las señales de excitación .....	57
3.9 Validación experimental de los ángulos de disparo del <i>Phased Array</i> .....	59
4. Modelo de estimación propuesto .....	66
5. Diseño del Sistema experimental .....	70
5.1 Propiedades del lodo y concentraciones de roca .....	71
5.2 Cálculo del caudal y velocidad del lodo .....	73
6. Resultados Experimentales .....	76
6.1 Estimación del flujo volumétrico de lodo y rocas .....	76
6.1.1 Modelos de estimación de concentración de roca a partir de la frecuencia Doppler .....	79
6.1.2 Modelo de estimación de concentración de rocas a partir del índice de transmisión .....	96
7. Conclusiones .....	111
8. Recomendaciones .....	116
Referencias Bibliográficas .....	118

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Tiempo de disparo de cada piezo-actuador para diferentes ángulos</i> .....	46
Tabla 2 <i>Características MFC0714P2</i> .....	47
Tabla 3 <i>Amplitud recibida por los piezoeléctricos</i> .....	48
Tabla 4 <i>Secuencia establecida de los piezoeléctricos</i> .....	49
Tabla 5 <i>Barrido en frecuencia en el transmisor</i> .....	50
Tabla 6 <i>Barrido de frecuencia en el receptor</i> .....	51
Tabla 7 <i>Barrido en frecuencia en un rango más cercano donde se percibe la señal recibida una mayor amplitud</i> .....	51
Tabla 8 <i>Desfase producido y requerido variando la capacitancia de <math>C_2</math></i> .....	56
Tabla 9 <i>Características del MOSFET IRF530</i> .....	58
Tabla 10 <i>Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de <math>\vartheta = 30^\circ</math></i> .....	62
Tabla 11 <i>Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de <math>\vartheta = 45^\circ</math></i> .....	63
Tabla 12 <i>Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de <math>\vartheta = 60^\circ</math></i> .....	64
Tabla 13 <i>Propiedades del lodo experimental</i> .....	71
Tabla 14 <i>Concentraciones de la roca experimental</i> .....	72
Tabla 15 <i>Caudal y velocidad a partir del tiempo de vaciado</i> .....	74

Tabla 16 <i>Cambio de la frecuencia observada para diferentes concentraciones de roca en el lodo</i> .....	77
Tabla 17 <i>Velocidades y caudales calculados a partir delta frecuencia Doppler y el tiempo de vaciado del tanque superior</i> .....	78
Tabla 18 <i>Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo polinómico de cuarto grado en función de la frecuencia Doppler</i> .....	81
Tabla 19 <i>Indicadores estadísticos para el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	82
Tabla 20 <i>Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	83
Tabla 21 <i>Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo logarítmico en función de la frecuencia Doppler</i> .....	87
Tabla 22 <i>Indicadores estadísticos para el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	87
Tabla 23 <i>Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	88
Tabla 24 <i>Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo Gompertz en función de la frecuencia Doppler</i> .....	92
Tabla 25 <i>Indicadores estadísticos para el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler</i>	92
Tabla 26 <i>Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	93
Tabla 27 <i>Índice de relación entre señal recibida/señal enviada</i> .....	97

Tabla 28 <i>Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo exponencial en función del índice de transmisión</i> .....	99
Tabla 29 <i>Indicadores estadísticos para el modelo exponencial a partir del índice de transmisión</i> .....	99
Tabla 30 <i>Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo exponencial a partir del índice de transmisión</i> .....	101
Tabla 31 <i>Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo polinómico de tercer grado en función del índice de transmisión</i> .....	106
Tabla 32 <i>Indicadores estadísticos para el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión</i> .....	107
Tabla 33 <i>Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión</i> .....	107

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Sistema de perforación de pozo</i> .....	21
Figura 2 <i>Sistema de circulación de lodo</i> .....	25
Figura 3 <i>Sistema de separación de lodo y recortes</i> .....	26
Figura 4 <i>Principio de medición de medidores de flujo ultrasónico Doppler.</i> .....	29
Figura 5 <i>Reflexión y transmisión de ondas acústicas que inciden en interfaz de diferente medio.</i> .....	31
Figura 6 <i>Haz de enfoque para incidencia normal y angular.</i> .....	33
Figura 7 <i>Diagrama de bloques PLL</i> .....	34
Figura 8 <i>Respuesta del PLL a un salto de frecuencia</i> .....	35
Figura 9 <i>Respuesta del PLL a un salto de fase.</i> .....	36
Figura 10 <i>Esquema eléctrico del PLL</i> .....	37
Figura 11 <i>Diagrama de bloques filtro LMS</i> .....	39
Figura 12 <i>Patrones de configuraciones Phased Array</i> .....	42
Figura 13 <i>Simulación Phased Array con 4 piezoeléctricos</i> .....	44
Figura 14 <i>Simulación Phased Array con 8 piezoeléctricos</i> .....	45
Figura 15 <i>Simulación Phased Array con 16 piezoeléctricos</i> .....	45
Figura 16 <i>Piezo eléctrico Micro Fiber Composite (MFC)</i> .....	47
Figura 17 <i>Pruebas de caracterización de los MFC0714P2</i> .....	48
Figura 18 <i>Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 30°</i> .....	53

Figura 19 Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para $45^\circ$ .....	53
Figura 20 Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para $60^\circ$ .....	54
Figura 21 Esquema eléctrico PLL.....	55
Figura 22 Desfase del PLL con $C_2 = 1 \text{ nF}$ .....	56
Figura 23 Circuito de la etapa de amplificación .....	57
Figura 24 Señal amplificada medida con el Picoscope .....	58
Figura 25 Señales amplificadas con desfase.....	59
Figura 26 Posiciones de los sensores para verificar el ángulo de inclinación - esquema .....	60
Figura 27 Arreglo de piezo-eléctrico sobre la tubería de acero.....	61
Figura 28 Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de $\vartheta_1 = 30^\circ$ .....	62
Figura 29 Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de $\vartheta_1 = 45^\circ$ .....	63
Figura 30 Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de $\vartheta_1 = 60^\circ$ .....	64
Figura 31 Diagrama de bloques del proceso de entrenamiento del modelo de estimación de flujo volumétrico de rocas .....	66
Figura 32 Diagrama de bloques del proceso de operación en línea del modelo de estimación de caudal volumétrico de rocas. ....	68
Figura 33 Sistema general del experimento para la estimación de cortes y derrumbes .....	70
Figura 34 Cantidad de rocas para concentración alta .....	72
Figura 35 Sistema de circulación de lodo experimental .....	73
Figura 36 FFT de la señal enviada y recibida después de aplicar el filtro adaptativo LMS .....	75

Figura 37 <i>Comparativa de las velocidades calculadas y estimadas por concentración de roca</i> .	79
Figura 38 <i>Modelo polinómico de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler</i> .....	80
Figura 39 <i>Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	84
Figura 40 <i>Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo polinómico de cuarto grado</i> .....	84
Figura 41 <i>Modelo logarítmico de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler</i> .....	86
Figura 42 <i>Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	89
Figura 43 <i>Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo exponencial</i> .....	89
Figura 44 <i>Modelo Gompertz de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler</i> .....	91
Figura 45 <i>Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler</i> .....	94
Figura 46 <i>Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo Gompertz</i> .....	95
Figura 47 <i>Modelo exponencial de estimación de concentración de roca en función del índice de transmisión</i> .....	98
Figura 48 <i>Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo exponencial a partir del índice de transmisión</i> .....	102

Figura 49 <i>Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo exponencial</i> .....	103
Figura 50 <i>Modelo polinómico de tercer grado de estimación de concentración de roca en función del índice de transmisión</i> .....	105
Figura 51 <i>Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión</i> .....	109
Figura 52 <i>Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo polinómico de tercer grado</i> .....	109

## Glosario

**Caudal volumétrico:** cantidad de volumen de fluido que pasa a través de una sección transversal por unidad de tiempo, habitualmente expresado en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ).

**Concentración de roca:** porcentaje en masa o volumen de partículas sólidas (recortes y derrumbes) presentes en el lodo de perforación.

**Efecto Doppler:** fenómeno físico que produce un cambio aparente en la frecuencia de una onda cuando la fuente y el observador están en movimiento relativo.

**Filtro LMS (Least Mean Squares):** algoritmo adaptativo usado en procesamiento digital de señales para minimizar errores e interferencias ajustando dinámicamente sus parámetros.

**Frecuencia Doppler:** frecuencia aparente medida en una señal acústica reflejada, desplazada debido al movimiento relativo entre la fuente y las partículas reflejantes.

**Índice de transmisión:** relación entre la magnitud del pico de señal recibida y la señal emitida, utilizada para estimar la concentración de sólidos en un fluido.

**Lodo de perforación:** fluido empleado en la perforación de pozos, cuya función principal es transportar los recortes a la superficie y mantener la estabilidad del pozo.

**Medición por efecto Doppler:** técnica para estimar la velocidad de partículas sólidas suspendidas en fluidos mediante el análisis del desplazamiento de frecuencia de señales ultrasónicas.

**Phased Array:** configuración de múltiples transductores piezoeléctricos que emiten ondas ultrasónicas con desfases controlados para orientar el haz a un ángulo y profundidad específicos.

**PLL (Phase-Locked Loop):** circuito electrónico que sincroniza la frecuencia y fase de un oscilador controlado por voltaje con una señal de referencia, permitiendo control de desfases.

**Recortes de perforación:** fragmentos de roca desprendidos durante la perforación, transportados por el lodo a la superficie.

**Velocidad del flujo:** rapidez con la que un fluido o mezcla se desplaza a través de una tubería, usualmente expresada en metros por segundo (m/s).

## Resumen

**Título:** Estimación del Flujo volumétrico de Cortes y Derrumbes de perforación, Usando Técnicas Acústicas\*

**Autor:** Leidy Lorena Arias Cabeza\*\*

**Palabras Clave:** Geomecánica de pozos, Estimadores de flujo, Fluido de perforación, Estabilidad de pozo, Medidores por efecto Doppler

**Descripción:** Las paradas que pueden producirse durante el proceso de perforación pueden reducirse considerablemente utilizando tecnologías eficaces que garanticen la estabilidad del pozo. Así, evitando tiempos de no producción, pérdidas monetarias o una rápida actuación en la modificación de las propiedades físicas o químicas del lodo para mejorar el proceso de perforación. Un indicador directo de la estabilidad mecánica del pozo es el flujo volumétrico de cortes y derrumbes cavidades, extraído durante el proceso. Actualmente, en muchos pozos, esta variable se mide manual e indirectamente en un momento del proceso. Consiste en registrar el tiempo de llenado de una bandeja de volumen conocido al final de la línea de flujo y un operador humano relaciona estos dos parámetros para calcular un flujo volumétrico (volumen conocido / tiempo de llenado).

Así, mediante la construcción de un dispositivo de estimación de flujo volumétrico de cortes y derrumbes cavidades de perforación con capacidad para operar en la línea, se podría conseguir una monitorización continua y un análisis geomecánica del pozo. Por lo tanto, este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo electrónico funcional para la estimación del flujo volumétrico basado en el efecto Doppler de la acústica generada por dispositivos piezoeléctricos, configurados en modo *phase array*. Este modo permite generar un frente de onda constructivo dirigido a un ángulo deseado que engloba con la técnica de medida de flujo por efecto Doppler.

El modelo de estimación propuesto se valida experimentalmente a nivel de laboratorio utilizando una tubería de acero al carbono que transporta una mezcla de lodo de perforación y cavings, desde un tanque elevado a otro en la parte inferior. Para el arreglo en modo *phased array*, piezoeléctricos flexibles MFC a lo largo de la tubería para emitir la señal y otros piezoeléctricos como sensores para posteriormente hacer una estimación flujo volumétrico mediante la correlación de frecuencias emitidas y recibidas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en Ingeniería Electrónica. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía.

## Abstract

**Title:** Estimation of the Volumetric Flow of Drill Cuttings and Cavings Using Acoustic Techniques\*

**Author:** Leidy Lorena Arias Cabeza\*\*

**Key Words:** Wellbore geomechanics, Flow estimators, Drilling fluid, Wellbore stability, Doppler-effect meters

**Description:** Drilling downtime can be significantly reduced by implementing efficient technologies that ensure wellbore stability. This helps to avoid non-productive time, financial losses, or the need for rapid intervention through adjustments to the physical or chemical properties of the drilling mud to optimize the drilling process. A direct indicator of wellbore mechanical stability is the volumetric flow of cuttings and cavings extracted during drilling. Currently, in many wells, this variable is measured manually and indirectly at certain stages of the operation. The conventional method consists of recording the filling time of a container of known volume at the end of the flow line, after which an operator relates these two parameters to calculate a volumetric flow rate (known volume / filling time).

By designing a device capable of estimating the volumetric flow of drill cuttings and cavings in-line, continuous monitoring and wellbore geomechanical analysis could be achieved. Therefore, this work focuses on the development of a functional electronic model for volumetric flow estimation, based on the Doppler effect of acoustic signals generated by piezoelectric devices arranged in a phased array configuration. This configuration allows the generation of a constructive wavefront directed at a desired angle, thereby enabling flow measurement through Doppler-effect techniques.

The proposed estimation model is experimentally validated at the laboratory scale using a carbon-steel pipeline that transports a mixture of drilling mud and cavings from an elevated tank to another at a lower level. For the phased array arrangement, flexible MFC piezoelectrics are distributed along the pipeline to emit signals, while other piezoelectrics are used as sensors. The volumetric flow is then estimated by correlating the emitted and received frequencies.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Master's Program in Electronic Engineering. Advisor: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía.

## 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 y derrumbes 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 cortes y derrumbes. 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 cortes y derrumbes de roca (1), (2).

Uno de los métodos más utilizados es la técnica Doppler, que estima la velocidad de las partículas sólidas (cortes y derrumbes) 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 la caracterización de la señal Doppler, se puede construir un modelo que relacione el cambio de frecuencia observado con el flujo volumétrico de cortes y derrumbes transportados, considerando el tamaño de los fragmentos y la concentración de sólidos (1), (3). Estudios más recientes han explorado configuraciones avanzadas como el uso de ultrasonido Doppler de onda continua, con resultados positivos en simuladores de arrebato de gas y flujos multifásicos, demostrando precisión comparable a medidores intrusivos tradicionales 4. Ensayos en laboratorio han reportado errores del orden del 10.5 % para cortes y derrumbes pequeños y hasta un 34.7 % para fragmentos grandes  $\geq 2\text{cm}$ , dependiendo del tamaño y concentración de partículas (1).

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 cortes y derrumbes en superficie (1, 3, 5).

Aunque el enfoque predominante sigue siendo el ultrasonido, han surgido otras tecnologías complementarias, como las ópticas. Algunos estudios han empleado cámaras 2D para estimar la velocidad del flujo y cámaras 3D para reconstrucciones volumétricas. Las primeras han mostrado errores entre 2% y 9%, mientras que las segundas requieren mayor investigación para lograr resultados consistentes (8). En paralelo, técnicas de ultrasonido de onda guiada han sido probadas en configuraciones tipo abrazadera, empleando la pared de la tubería como medio de transmisión. Estas configuraciones permiten medir caudales de lodo con mayor sensibilidad y menor mantenimiento, aunque su enfoque ha sido el flujo general de lodo más que la estimación directa de cortes y derrumbes de gran tamaño (6).

A pesar del progreso técnico, la literatura especializada revela importantes vacíos: no se han encontrado estudios experimentales que comparen sistemáticamente métodos no invasivos (ultrasonido, ópticos, acústicos, microondas) bajo condiciones reales o de campo para rocas grandes  $\geq 2\text{cm}$  en lodo base agua (7, 9). Además, las simulaciones y bancos de prueba existentes se centran exclusivamente en técnicas ultrasónicas, sin validación cruzada entre metodologías ni pruebas de campo a gran escala.

Estas carencias abren una oportunidad para el desarrollo de soluciones híbridas, validaciones transmodales y estudios en ambientes operacionales reales, que permitan establecer los límites de sensibilidad, precisión y viabilidad de implementación práctica de cada tecnología.

## **1. Planteamiento del problema**

Es de gran importancia emplear diferentes tecnologías que optimicen y garanticen el proceso de perforación y la estabilidad del pozo para evitar pérdidas y tiempos de no producción. Actualmente pocas industrias petroleras han optado por utilizar métodos para la medición de flujo de cortes y derrumbes de forma automatizada y en tiempo real, lo que conlleva a una inexactitud en la medición.

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) plantea la necesidad sobre la estimación del flujo de lodo y rocas de perforación, para lograr un análisis continuo del comportamiento mecánico del pozo, evitando atascamientos en la línea de circulación de lodos y grandes pérdidas monetarias por el tiempo de no producción.

Cada vez son más los medidores de flujo ultrasónico basados en técnicas de efecto Doppler, utilizados en diferentes industrias. Siendo ideales para garantizar una mayor exactitud y mínimamente intrusivo sobre la línea de flujo.

**Figura 1***Sistema de perforación de pozo*

*Nota:* Tomado de: United States Geological Survey (USGS). Mud rotary drilling, Locust Valley, Long Island, New York [Internet]. Reston (VA): USGS; 2005

Con el fin de reemplazar sistemas manuales como el de la figura 1, para la estimación de cortes y derrumbes de perforación, se hace necesario desarrollar tecnologías que faciliten el proceso de dicha estimación, garantizando mínimamente intrusivo, portabilidad, fácil instalación y mantenimiento, y lo más importante, tener un dato de flujo volumétrico de cortes y derrumbes

con mayor exactitud que permita el monitoreo continuo de la estabilidad del pozo a partir de este indicador.

El trabajo de investigación abordará algunos de los problemas relacionados con el uso de técnicas de ultrasonido para la estimación de flujo volumétrico de cortes y derrumbes sobre tuberías metálicas de acero-carbono. Debido a la alta impedancia acústica en materiales metálicos, la onda incidente generada por el piezo-actuador tenderá a reflejarse por toda la superficie de la tubería y una mínima parte de la onda lograría traspasar hasta su interior (donde fluye lodo y rocas) para ser implementado un estimador con técnicas de medición de flujo basadas en efecto Doppler.

### **1.1 Propuesta de investigación**

Para tener una mayor probabilidad de transmisión de la onda ultrasónica al interior de la tubería, se implementa un sistema *phased array* como fuente emisora de la señal. Esto permite direccionar un conjunto de señales ultrasónicas, formado un frente de onda angular. Más adelante se describe un modelo de experimentación a nivel de laboratorio. Este modelo consta de un sistema que transporta lodo y rocas de un tanque a otro, y sobre la tubería se encuentra toda la instrumentaria electrónica para la emisión y recepción de señales ultrasónicas y así lograr una estimación de del volumen del fluido que pasa a través de esta.

En este experimento, se tienen en cuenta aspectos de diseño como:

- Las diferentes técnicas de estimación de flujo volumétrico a partir del ultrasonido y elección de la más adecuada.
- La configuración de los piezo actuadores que proporciona mayor señal transmitida al interior de la tubería de acero carbono.
- La determinación de los tiempos de disparo de los piezo-actuadores para formar una onda incidente al interior de la tubería de acero carbono.

- Implementación del circuito diseñado para desfasar las señales de cada uno de piezo-actuadores que conforman el arreglo *phased array*.
- Las limitaciones del hardware de los equipos y componentes como el acero carbono, al momento de desarrollar el prototipo.
- Acercar lo mejor posible las condiciones de una línea de flujo de campo al de laboratorio. Desde la composición del lodo, material de la línea de flujo y cortes de roca para el experimento.

## 1.2 Objetivo General

Estimar el flujo volumétrico de cortes y derrumbes extraídos en el proceso de perforación, conducidos por lodo en una tubería de acero-carbono, basado en el efecto Doppler que se produce al reflejar una onda ultrasónica en dichos cortes y derrumbes en movimiento.

## 1.3 Objetivos Específicos

OE1: Estudiar el efecto de ondas acústicas sobre un material de alta impedancia acústica como lo es la aleación acero-carbono, con el fin de lograr emitir una onda de ultrasonido direccionada al interior de una tubería de dicho material.

OE2: Emitir una onda direccionada a un determinado ángulo, hacia el interior de una tubería de acero-carbono, seleccionando la configuración más adecuada y obteniendo la secuencia de disparo de un conjunto de piezo-actuadores ordenados en modo *Phased Array*.

OE3: Medir la onda de ultrasonido reflejada por los cortes y derrumbes que fluyen junto con lodo en una tubería de acero-carbono, utilizando una adecuada configuración de piezo-sensores, con el fin de tener en cuenta diferentes ocupaciones de los cortes y derrumbes en el área transversal de la tubería.

OE4: Proponer un algoritmo de estimación del flujo volumétrico de cortes y derrumbes, basado en el cambio de frecuencia aparente (Efecto Doppler) que se produce en la onda de ultrasonido reflejada por dichos cortes y derrumbes.

OE5: Validar experimentalmente el algoritmo propuesto, implementado en un modelo electrónico funcional de estimación de flujo volumétrico de cortes y derrumbes, utilizando un montaje de laboratorio que genere un flujo conocido de lodo y rocas en una tubería de acero-carbono.

## **1.4 Producción Académica**

### ***1.4.1 Conferencias internacionales***

Estimation of Volumetric Flow of Cuts and Cavings, Using Ultrasound Techniques, Poster Session. 32nd ASNT Research Symposium, Pittsburgh, Pennsylvania. (2024)

Estimación de flujo Volumétrico de cortes y derrumbes de perforación usando técnicas acústicas. Ponencia. 5to Congreso internacional de perforación, Buenos Aires, Argentina. (2025)

Modelos de estimación de rocas de perforación usando técnicas acústicas. Ponencia. Simposio internacional de geomecánica, Bucaramanga, Colombia. (2025)

### ***1.4.2 Proyectos de pregrado***

Generación de una onda constructiva dentro de una tubería de acero-carbono, mediante piezoactuadores en modo Phased Array. Nicolás Cardozo Acuña y Cristian Mauricio Chacón Martínez.

## 2. Marco Conceptual

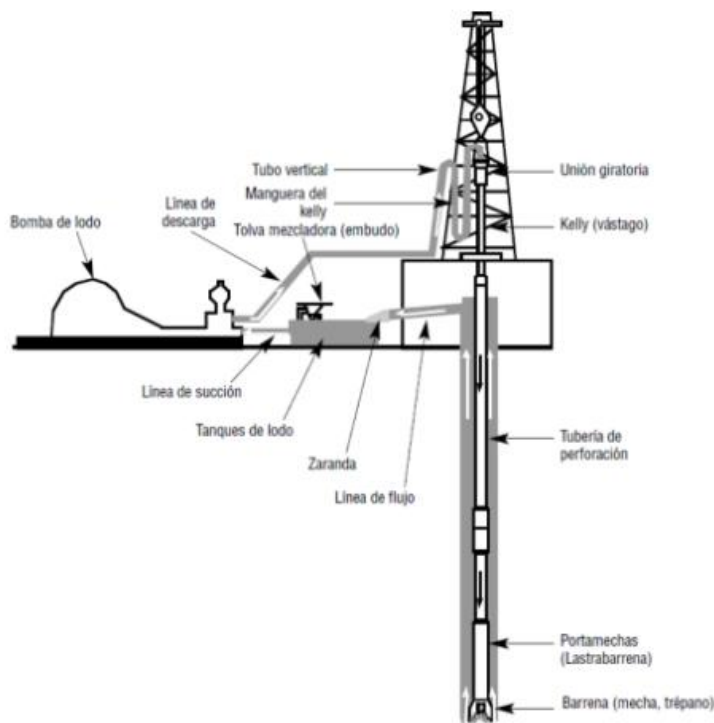
A continuación, se explican los conceptos básicos necesarios para entender la metodología de estimación de concentración de rocas propuesta

### 2.1 Sistema de perforación

Para mantener limpia la barrena de perforación y proporcionar una nueva superficie de roca para la barrena (herramienta utilizada para triturar o cortar la roca) se inyecta lodo a gran velocidad y éste mismo lodo sube por el espacio anular entre la tubería de perforación y el espacio anular del pozo, transportando con los cortes y derrumbes hechos por la barrena del pozo (Figura 2).

#### Figura 2

*Sistema de circulación de lodo*

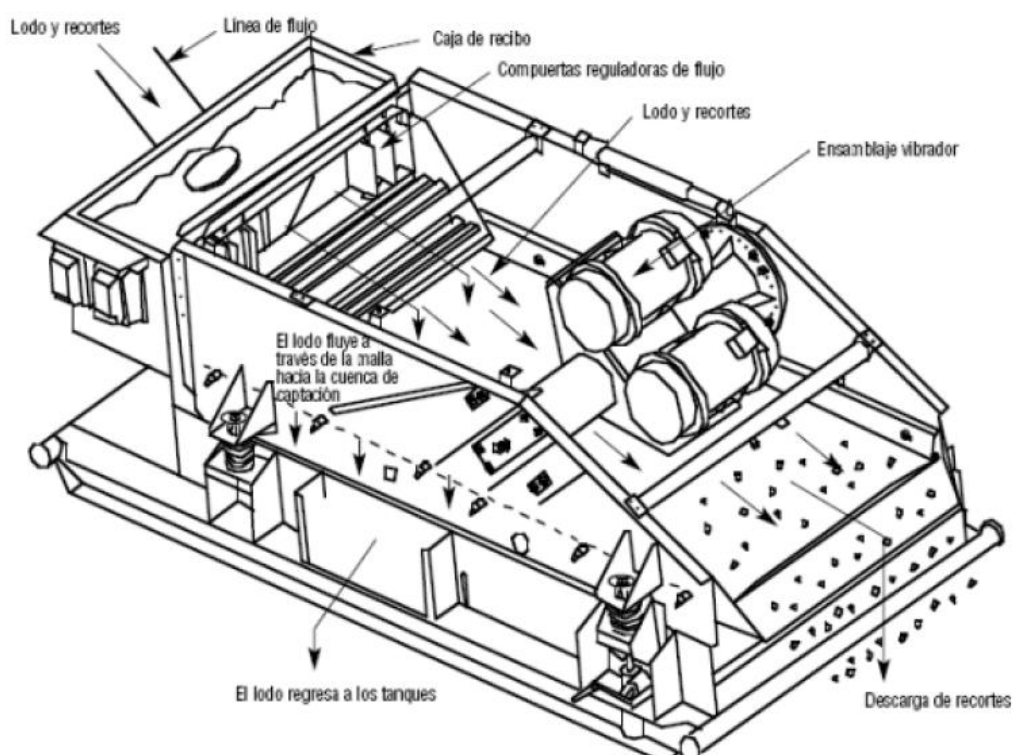


Nota. Tomado de Swaco, MI. 2014. *Manual de lodos*. p. 1.12.

Después de subir a la superficie, el lodo y su carga de cortes y derrumbes pasan a través de una tubería inclinada llamada línea de flujo (ó flow-line) hasta llegar a unas mallas vibratorias sobre la zaranda, encargada de separar el lodo de los cortes y derrumbes más grandes (Figura 3). Así, luego vuelve a inyectarse el lodo separado y se procede a pesar y caracterizar los cortes y derrumbes, ayudando al análisis de la estabilidad del pozo. Las tuberías de línea de flujo se fabrican principalmente en aleaciones especiales de acero, debido que está sometida exigencias mecánicas como fuerzas de tensión, compresión, fatiga entre otros y además deben soportar esfuerzos inducidos a las conexiones que lo unen a todo el sistema de circulación. (10)

### Figura 3

*Sistema de separación de lodo y recortes*



*Nota.* Tomado de Swaco, MI. 2014. Manual de sistemas de fluidos base agua. p. 1.12.

### ***2.1.2 Lodo de perforación***

El fluido de perforación permite la buena condición del pozo de perforación. Es por esto, que el lodo de perforación cumple numerosas funciones de acuerdo con sus características físicas y químicas en su composición. Entre las funciones principales está el control de la presión en el subsuelo, arrastrar a la superficie los cortes y derrumbes desprendidos en el proceso, enfriar y lubricar, ya que a medida que aumenta el hoyo también aumenta la temperatura. Evitar la corrosión y prolonga la durabilidad de la barrena.

Una de sus funciones es el enfriar y lubricar la barrena, debido a que a medida que se aumenta la longitud hoyo del pozo, por cada 55 metros también se aumenta la temperatura de 1 a 1.3 °C, permitiendo prolongar la durabilidad de los elementos de la barrena. Este fluido también permite arrastrar a la superficie los cortes y derrumbes desprendidos en el proceso, permitiendo que el fondo del hoyo se mantenga limpio y la barrena pueda avanzar eficazmente. (11)

Hay diferentes tipos de fluidos de perforación, cada uno de ellos son diseñados de acuerdo con la necesidad del pozo. Los principales fluidos de perforación están compuestos por:

- Lodo base agua
- Lodo base aceite
- Fluidos neumáticos

Cada uno de ellos lo compone una parte líquida, otra sólida y por compuestos químicos que permiten controlar las características deseadas.

La preparación del fluido de perforación es en base de agua, de aceite o emulsiones, donde se debe caracterizar su composición en tres partes principales, la parte líquida, la parte sólida compuesta por material soluble y por material insoluble de alta densidad que le imparte peso y por compuestos químicos que permiten controlar las características deseadas. (12)

## 2.2 Principio de transmisión de ondas ultrasónicas

### 2.2.1 Medición por efecto Doppler

La tasa de flujo másico  $\dot{m}_F(t)$  [kg/s] mide la cantidad de masa  $m_F(t)$  por unidad de tiempo, por lo tanto, se define como:

$$\dot{m}_F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_F(t)}{\Delta t} = \frac{dm_F(t)}{d\Delta t} \quad (2.1)$$

Si se tiene un fluido con una densidad constante que fluye a través de una tubería circular con sección transversal  $A_P$  con una tasa de flujo  $V_F(r, t)$  dependiente del radio de la tubería y del tiempo, la tasa de flujo másico se podría escribir como la ecuación (2.2).

$$\dot{m}_F(t) = \rho_0 \int_{A_P} V_F(r, t) dA \quad (2.2)$$

Además del caudal másico, el caudal volumétrico  $\dot{V}_F(t)$  [ $m^3/s$ ] determina la cantidad física de volumen másico en el flujo.

$$\dot{V}_F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V_F(t)}{\Delta t} = \frac{dV_F(t)}{dt} \int_{A_P} V_F(r, t) dA \quad (2.3)$$

Mediante medidores de flujo ultrasónico, en realidad se calcula el promedio de la velocidad  $\bar{v}_F(t)$  a partir de la propagación de las ondas ultrasónicas en el fluido, que conlleva a la estimación del promedio de la velocidad del fluido  $\bar{v}_A(t)$ , en un área transversal  $A_P$ , por tanto, el flujo volumétrico está dado por la ecuación (2.4).

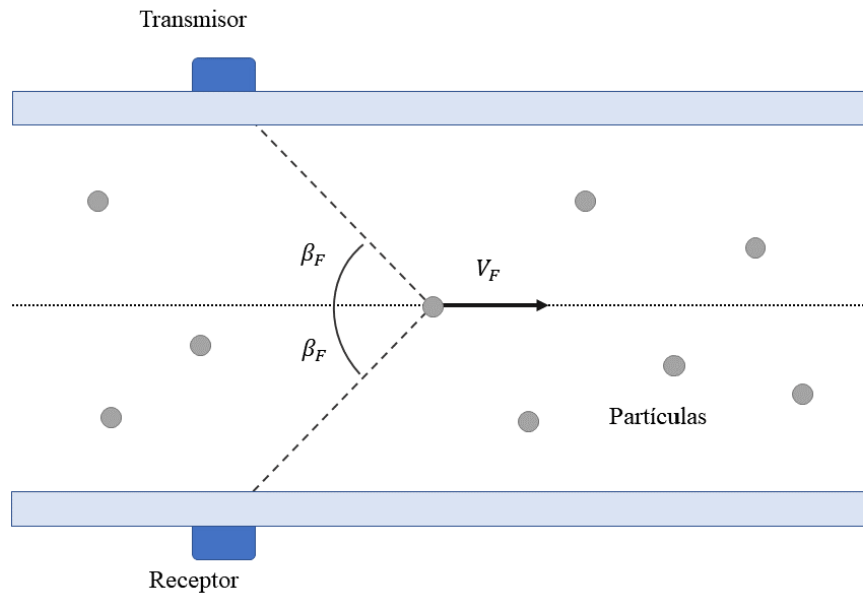
$$\dot{V}_F(t) = \bar{v}_A(t) A_P \quad (2.4)$$

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. (13), (14), (15)

#### Figura 4

*Principio de medición de medidores de flujo ultrasónico Doppler.*



Considerando la Figura 4, el eje central de los transductores y el eje de la tubería forma un ángulo  $\beta_F$  donde el flujo se moverá a lo largo de la tubería con una velocidad  $V_F$ , si el cristal piezoeléctrico transmisor genera una onda de sonido con una frecuencia  $f_T$  la frecuencia de la partícula  $f_P$  en movimiento estará dada por:

$$f_P = f_T \left( 1 + \frac{V_F \cdot e_{PT}}{C_F} \right) = f_T \left( 1 - \frac{V_F \cos \beta_F}{C_F} \right) \quad (2.5)$$

Siendo  $e_{PR}$  el vector unitario desde la partícula al cristal transmisor es así como la partícula suspendida en el flujo puede tratarse ahora como una fuente de sonido.

La frecuencia de sonido adquirida desde el cristal receptor está dada por:

$$f_R = f_T \left( \frac{1 + \frac{V_F \cdot e_{PT}}{C_F}}{1 - \frac{V_F \cdot e_{PR}}{C_F}} \right) = f_T \left( \frac{1 - \frac{V_F \cos \beta_F}{C_F}}{1 + \frac{V_F \cos \beta_F}{C_F}} \right) \quad (2.6)$$

En donde  $e_{PR}$  denota el vector unitario desde la partícula al cristal piezoeléctrico receptor.

Debido a que  $V_F \ll C_F$  la ecuación puede simplificarse en:

$$f_R \approx f_T \left( 1 - \frac{2V_F \cos \beta_F}{C_F} \right) \quad (2.7)$$

Despejando:

$$V_F = \frac{C_F(f_T - f_R)}{2 \cos \beta_F f_T} \quad (2.8)$$

### 2.2.2 Reflexión y refracción del sonido

Cuando una onda de sonido incide sobre dos materiales con diferentes propiedades físicas puede ocurrir reflexión y refracción de las ondas. Para ondas planas sinusoidales de frecuencia  $f$ , la distancia geométrica entre los dos máximos  $\lambda$  está dada por las relaciones fundamentales de la propagación de la onda (2.9), donde  $\omega$  es la frecuencia angular y  $k$  el número de onda. (13)

$$\lambda = \frac{C_0}{f} = \frac{2\pi C_0}{\pi} = \frac{2\pi}{k} \quad (2.9)$$

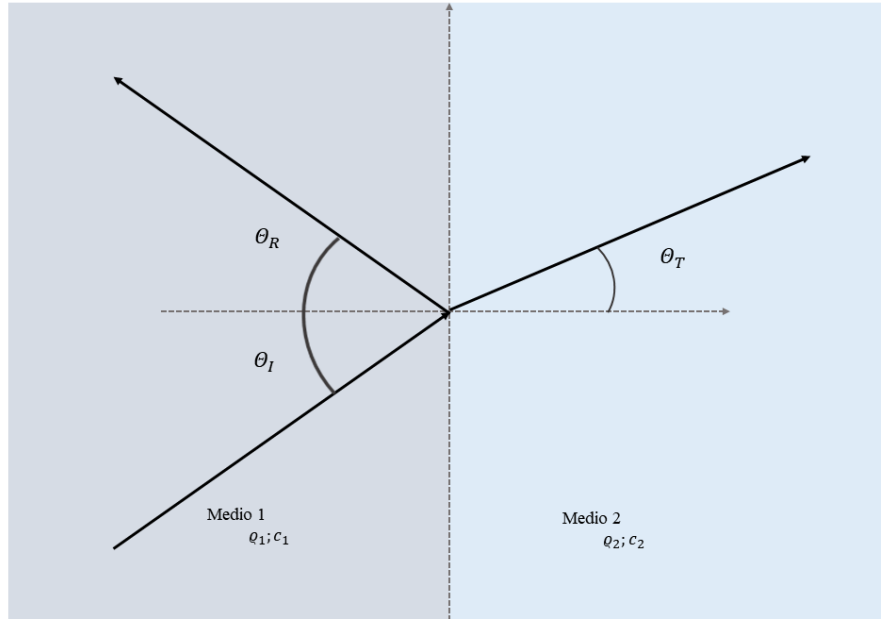
La impedancia acústica es un parámetro que caracteriza el comportamiento de las ondas sonoras en diferentes medios, en el caso de una onda de sonido, la impedancia está dada por:

$$Z_{aco} = \frac{\hat{p} \sim}{\hat{v} \sim} = \rho_0 C_0 \quad (2.10)$$

Donde  $\hat{p}$  es la amplitud de la presión del sonido y  $\hat{v}$  la velocidad de las partículas, en medios sólidos es más común de la impedancia como una relación proporcional a la densidad del material  $\rho_0$  y la velocidad del sonido en el material  $C_0$ . Es por esto por lo que en materiales sólidos los valores de impedancia son mucho mayores que la de los gases y líquidos.

**Figura 5**

*Reflexión y transmisión de ondas acústicas que inciden en interfaz de diferente medio.*



Cuando se tienen dos medios con materiales homogéneos diferentes como se ve en la Figura 5, donde tienen valores diferentes en las densidades, así como en las velocidades del sonido. Es así como una onda de sonido que incide sobre el medio 1 en el plano  $xy$  se puede describir como

$$P_I(x, y) = \hat{P}_I e^{jk_1[x \cos \theta_I + y \sin \theta_I]} \quad (2.11)$$

Donde  $\theta_I$  es el ángulo de la onda de sonido incidente y  $k_1$  el número de la onda incidente en el medio 1. La onda reflejada en el medio 1  $P_R$  y la onda transmitida en el medio 2  $P_T$  están dadas por:

$$P_R(x, y) = \hat{P}_R e^{jk_1[-x \cos \theta_R + y \sin \theta_R]} \quad (2.12)$$

$$P_T(x, y) = \hat{P}_T e^{jk_1[x \cos \theta_T + y \sin \theta_T]} \quad (2.13)$$

Donde  $k_2$  es el número de la onda en el medio 2.  $\theta_R$  y  $\theta_T$  son los ángulos de las ondas de reflexión y transmisión. Los valores de la onda de presión incidente y reflejada coinciden con la onda de presión transmitida cuando  $x = 0$ , entonces

$$P_I(0, y) + P_R(0, y) = P_T(0, y) \quad (2.14)$$

Como (2.14) debe cumplirse, se deducen las siguientes relaciones:

$$k_1 \theta_I = -k_1 \theta_R \quad (2.15)$$

$$k_1 \theta_I = -k_1 \theta_R \quad (2.16)$$

El ángulo de la onda de presión incidente  $\theta_I$  y el ángulo de la onda de presión reflejada  $\theta_R$  son iguales, esto se le conoce como ley de reflexión de la acústica. Utilizando la ecuación (2.9) se puede reescribir (2.16) y obtener

$$\frac{\sin \theta_I}{c_1} = \frac{\sin \theta_T}{c_2} \quad (2.17)$$

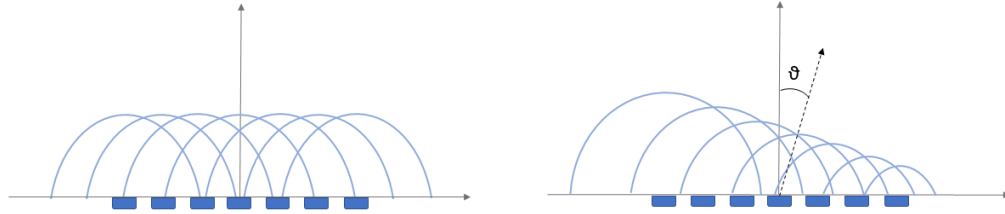
La ecuación (2.17) se conoce como ley de refracción para la acústica, o más conocido en la óptica como ley de Snell. (13)

### 2.3 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.

### Figura 6

Haz de enfoque para incidencia normal y angular.



Cada elemento de la matriz compuesta de piezoeléctricos 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 (16) (Figura 6).

Cuando se tiene un arreglo  $1 \times N$  en la matriz modo *phased array*, con un ángulo de incidencia  $\vartheta$ , tiempo de fase de cada uno de los actuadores piezoeléctricos está dado por la ecuación (2.18). (17)

$$t_n = n \frac{p}{c} \sin \vartheta + t_n \quad (2.18)$$

$$\{t\}_{n} = 1, \dots, N \quad (2.19)$$

Y si además se combina el calcular los tiempos de fase incluyendo con un punto focal de distancia  $F$ , el tiempo de fase de cada uno de los actuadores esta dado por la ecuación (2.20).

$$t_n = \frac{F}{c} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{N}p}{F}\right)^2} + \frac{2\bar{N}p}{F} \sin \vartheta - \sqrt{1 + \left(\frac{(n - \bar{N})p}{F}\right)^2} + \frac{2(n - \bar{N})p}{F} \sin \vartheta \right] \quad (2.20)$$

$$\bar{N} = \frac{N - 1}{2} \quad (2.21)$$

Donde:

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

$F$ : Distancia al punto focal.

$c$ : Velocidad del sonido en el medio de transmisión.

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

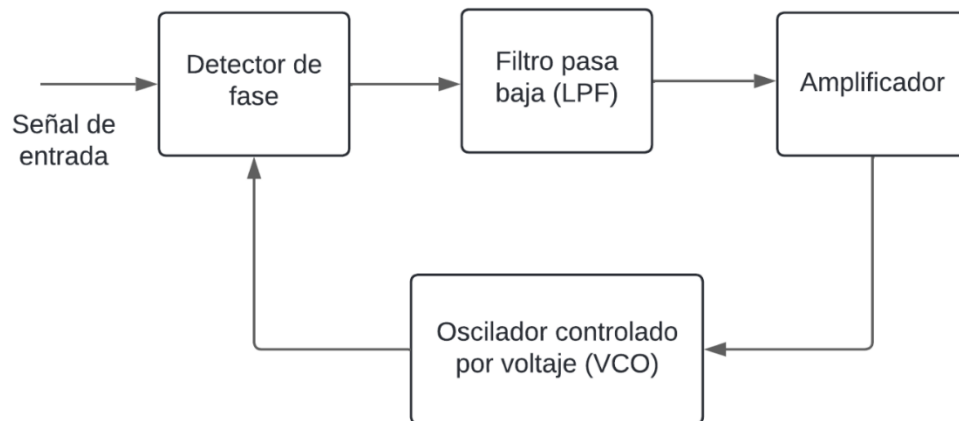
$\vartheta$ : Ángulo de incidencia del frente de onda.

## 2.4 Phased-Locked Loop (PLL)

El Phase-Locked Loop (PLL) es un dispositivo que se retroalimenta para garantizar la frecuencia o fase de un oscilador controlado por voltaje (VCO). Un PLL está compuesto por tres unidades principales. (Figura 7). La primera es un detector de fase, que tiene dos entradas: la señal externa y la señal de control del VCO. El detector de fase genera un voltaje proporcional a la diferencia de fase. Esta señal pasa a través de un filtro pasa bajas (LPF), que elimina las señales de alta frecuencia no deseadas. Posteriormente, la señal filtrada es amplificada y llega al VCO, que ajusta su frecuencia para que la señal de salida tenga la misma frecuencia que la señal de entrada, aunque con un desfase respecto a esta. (16)

**Figura 7**

*Diagrama de bloques PLL*



### 2.4.1 Comportamiento dinámico del PLL

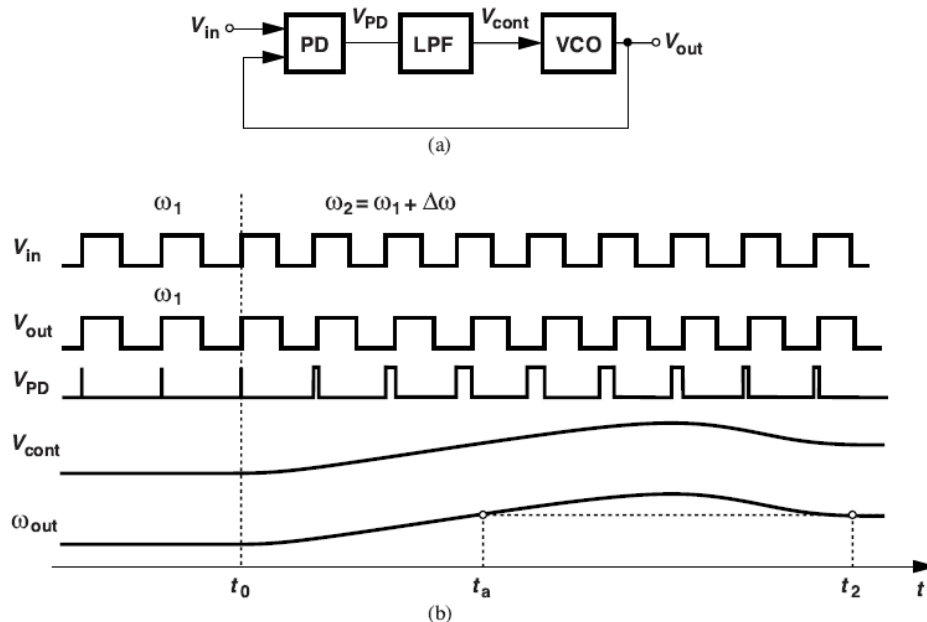
En la Figura 8, se observa la respuesta del PLL a un cambio en la frecuencia de entrada. Inicialmente, el filtro pasa-bajo (LPF) mantiene constante el voltaje de control  $V_{\text{cont}}$ , mientras el VCO sigue en su frecuencia inicial  $\omega_1$ . Cuando ocurre el salto de frecuencia a  $\omega_1 + \Delta\omega$ , la diferencia de fase aumenta y los pulsos del detector de fase (PD) se ensanchan, incrementando  $V_{\text{cont}}$  y ajustando  $\omega_{\text{out}}$  hasta que el sistema se vuelve a bloquear.

En la Figura 9, se muestra la respuesta del PLL a un cambio en la fase de entrada. Este cambio implica un ajuste instantáneo en el borde de la señal de entrada, aumentando la diferencia de fase y ajustando gradualmente ( $V_{\text{LPF}}$ ), lo que permite al VCO sincronizarse nuevamente con la señal de entrada.

Estas figuras destacan cómo el PLL ajusta su frecuencia y fase en respuesta a cambios en la señal de entrada, estabilizando finalmente el sistema.

#### Figura 8

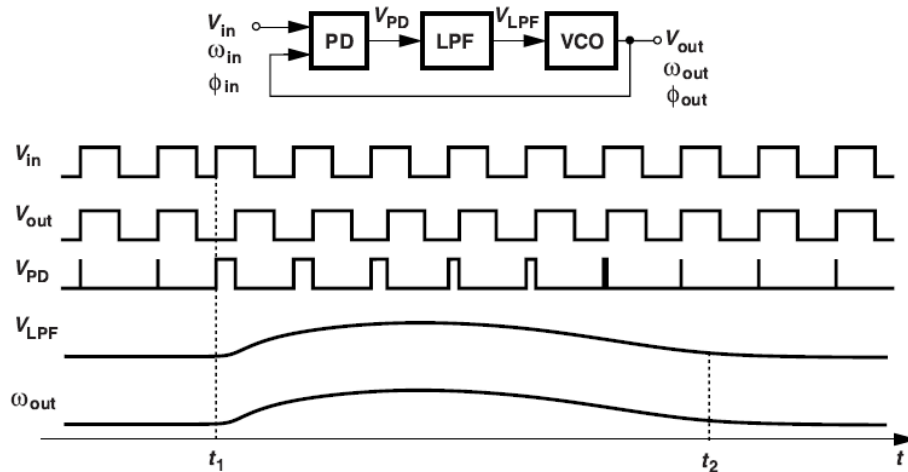
*Respuesta del PLL a un salto de frecuencia*



*Nota.* Tomado de Razavi, B. 2020. Design of CMOS Phase-Locked Loops: From Circuit Level to Architecture Level. Cambridge University Press. p. 216.

### Figura 9

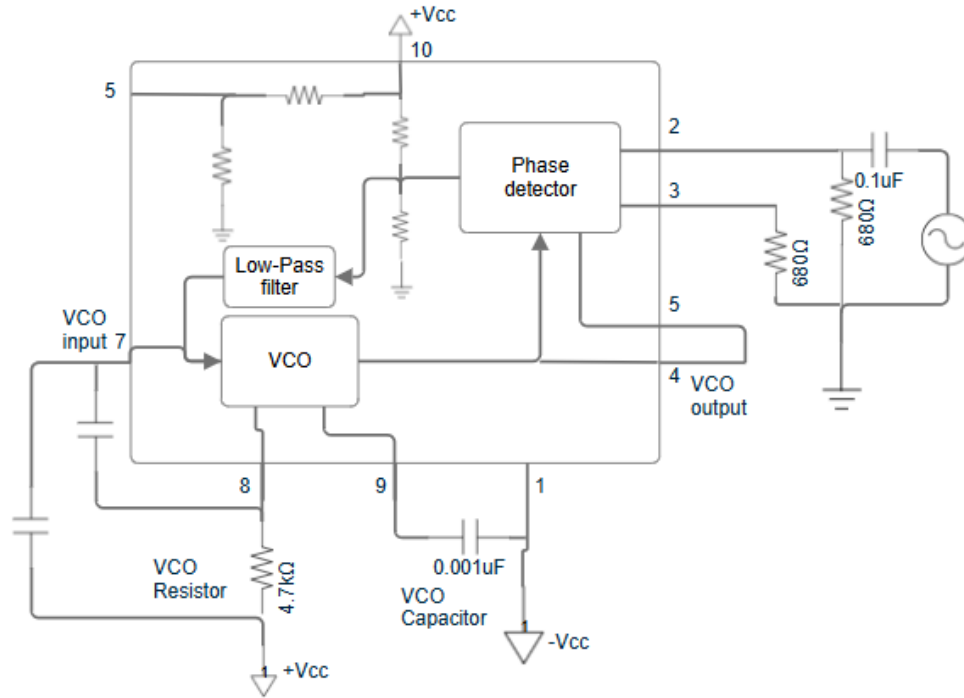
*Respuesta del PLL a un salto de fase.*



*Nota.* Tomado de Razavi, B. 2020. Design of CMOS Phase-Locked Loops: From Circuit Level to Architecture Level. Cambridge University Press. p. 216.

#### 2.4.2 PLL IC 565

El circuito tiene una configuración como lo muestra la Figura 10. El VCO es capaz de generar una onda cuadrada estable y se puede utilizar en un rango de frecuencias de 0.1Hz a 500kHz. (18)

**Figura 10***Esquema eléctrico del PLL*

Donde  $R_1$  y  $C_1$  son elementos pasivos externos y que se ajustan de tal forma que la frecuencia libre del VCO. Esta frecuencia central en un IC555 está dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{f}_o = \frac{0.3}{R_1 C_1} \quad (2.22)$$

Igualmente, la frecuencia de bloqueo del PLL está dado por:

$$\bar{f}_L = \frac{8f_o}{V} \quad (2.23)$$

la frecuencia de captura:

$$\sqrt{\frac{f_L}{2\pi \cdot 3.6kC_2}} \quad (2.24)$$

## 2.5 Filtro LMS (Least Mean Squares)

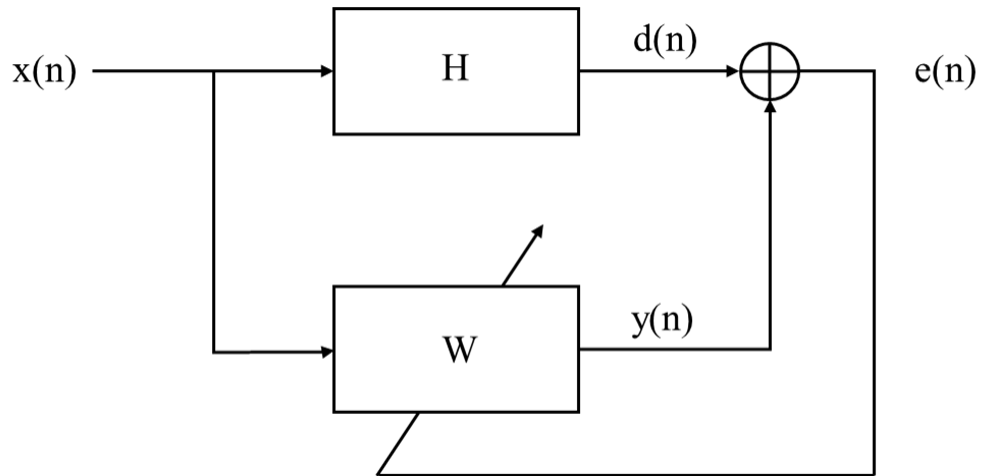
El filtro adaptativo LMS (*Least Mean Squares*) constituye una herramienta fundamental en el procesamiento digital de señales, especialmente en aplicaciones de cancelación de ruido e interferencias. A diferencia de los filtros tradicionales de respuesta fija, el filtro LMS posee la capacidad de ajustar dinámicamente sus parámetros internos (coeficientes) en función de la información que recibe, todo ello mediante un proceso de retroalimentación que le permite “aprender” en tiempo real mientras opera (19-22).

El principio central del algoritmo LMS radica en la minimización continua de una señal de error, definida como la diferencia entre la señal deseada y la salida actual del filtro. En cada instante, el filtro LMS compara la señal procesada con una referencia (que puede ser una señal deseada o una estimación libre de ruido) y calcula el error resultante. Este error se emplea para reajustar automáticamente los coeficientes del filtro, guiando la adaptación hacia una configuración que reduzca progresivamente la energía del error observado.

Conceptualmente, este proceso puede representarse mediante un diagrama de bloques en el que el filtro LMS recibe como entradas tanto la señal corrupta (compuesta por la suma de la señal útil y el ruido) como una referencia del ruido a cancelar. El filtro genera una salida estimada del ruido, la cual es restada de la señal de entrada principal. El resultado de esta sustracción constituye la señal de error, la cual no solo es la salida final (la señal con el ruido atenuado), sino también la base para ajustar iterativamente los parámetros del filtro siguiendo una sencilla regla de actualización.

**Figura 11**

*Diagrama de bloques filtro LMS*



Donde:

- $x(n)$ : 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.

La principal ventaja del filtro LMS es su carácter adaptativo y su bajo costo computacional, lo que facilita implementaciones en tiempo real y aplicaciones prácticas en condiciones donde las características estadísticas del entorno no son conocidas con precisión de antemano. (19), (21) Ejemplos típicos de aplicación incluyen la cancelación activa de ruido en auriculares y sistemas HVAC, la supresión de ecos en comunicaciones y la mejora de la calidad de audio o voz en entornos ruidosos.

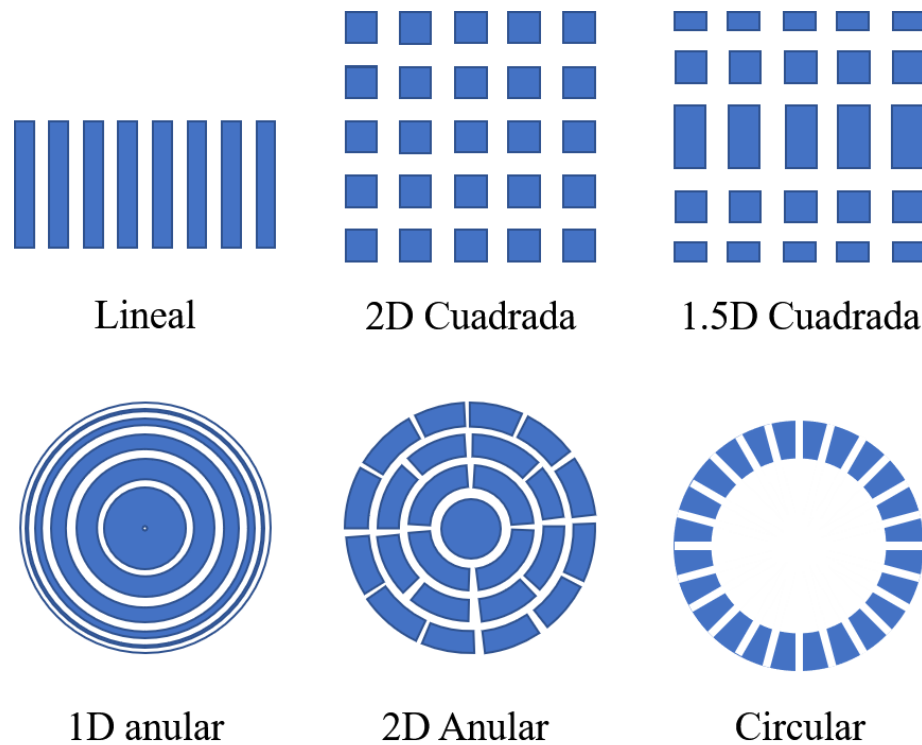
En suma, el filtro LMS sobresale por su capacidad de aprendizaje progresivo a partir del error cometido, por lo que resulta especialmente eficaz en entornos dinámicos o poco predecibles, y permite al sistema adaptarse automáticamente para lograr una cancelación de ruido robusta sin requerir modelos matemáticos complejos ni conocimiento previo exhaustivo del entorno de operación.

### **3. Generación de frente de onda en Modo Phased Array**

En este capítulo se describen en detalle los parámetros esenciales para la configuración óptima del modo *Phased Array*, la determinación de los tiempos de desfase en cada uno de los elementos piezoeléctricos, la caracterización de los piezo-actuadores, y la sincronización electrónica del disparo y desfase en cada uno de los elementos del *Phased Array*. Además, se abordan las características físicas del experimento, tales como las propiedades del lodo y las concentraciones de roca, el acoplamiento de los elementos piezoeléctricos a la tubería, y el método para la validación de la emisión del frente de onda angular y la estimación del flujo volumétrico.

#### **3.1 Configuraciones del modo Phased Array**

Teniendo en cuenta que uno de los propósitos para desarrollar este proyecto es la transmisión de la onda ultrasónica al interior de la tubería para que así pueda ser reflejada por partículas o rocas en movimiento dentro de la tubería. Para esto se debe buscar la mejor configuración que se adapte tanto al medio de transmisión (tubería de acero-carbono), como a la disposición de hardware para la elaboración del experimento.

**Figura 12***Patrones de configuraciones Phased Array*

Como se observa en la Figura 12, existen seis diferentes tipos de configurar el modo *Phased Array*.

- Arreglo 1D y 1.5D Lineal: Es el arreglo más utilizado en inspecciones de haz recto y haz angular, es fácil de fabricar y logra enfocarse a diferentes profundidades y ángulos, pero al mismo tiempo requiere de un gran tamaño para enfocar a más profundidad.
- Arreglo 1.5D Cuadrado: Este arreglo tiene la capacidad de direccionar el frente de onda en tres dimensiones, enfoque esférico o en un solo eje. El diseño y la fabricación es más complejo por la cantidad de piezo-eléctricos necesarios y la programación es más compleja.

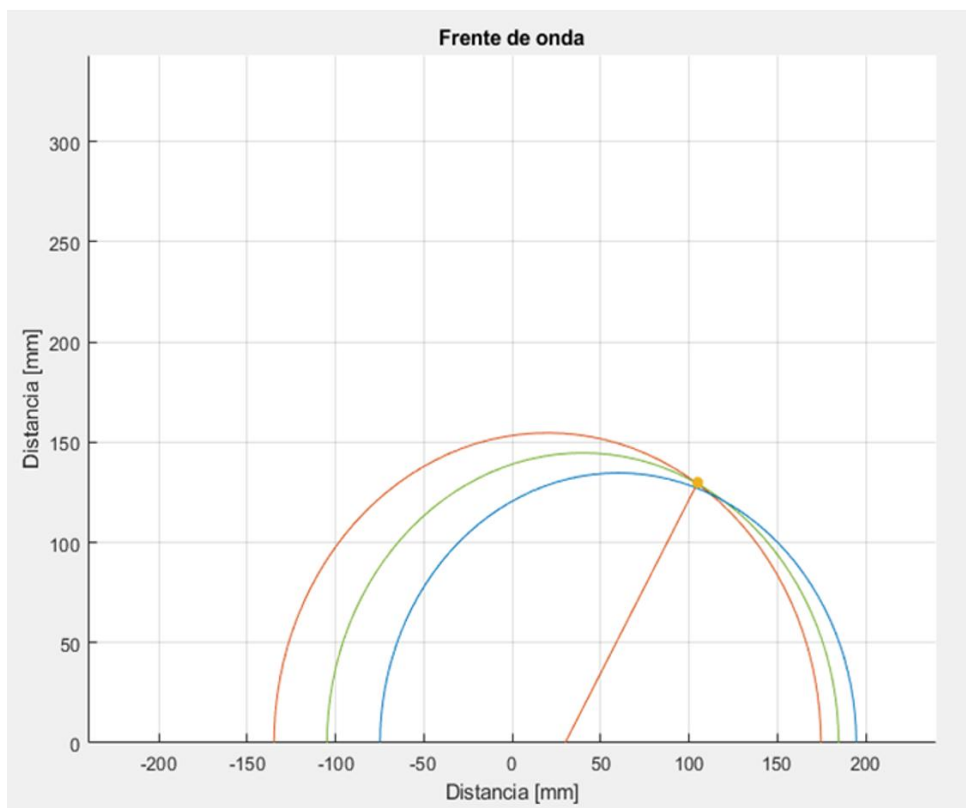
- Arreglo 1D Anular: Tiene un enfoque esférico a diferentes profundidades y es ideal para detectar pequeños reflectores. Pero no tiene gran capacidad de dirección, requiere de una gran apertura para un enfoque nítido y su programación es compleja.
- Arreglo 2D Anular Segmentado: Permite un haz elíptico o esférico con capacidad de dirección a diferentes ángulos y profundidades. Requiere de un gran número de piezo-eléctricos y su programación es compleja, al mismo tiempo solo genera ondas longitudinales.
- Arreglo 1D Circular: Esta configuración permite un haz elíptico o esférico con capacidad de dirección a diferentes profundidades, es utilizado en superficies esféricas o curvas, además que es complejo su diseño y fabricación.

Para elegir la mejor configuración *Phased Array* para el modelo de estimación de flujo volumétrico, se tuvo en cuenta que: el número de piezo-actuadores disponibles para el experimento son 16, los piezo-actuadores se encuentran en la superficie de la tubería de 3" de diámetro, la complejidad de la programación, la dirección y la profundidad del haz de sonido para utilizar el principio físico del Efecto Doppler.

Por consiguiente, se determina que la mejor configuración para el arreglo de fase es la lineal o vectorial. Ahora, se debe determinar la cantidad de piezo actuadores que conforman el vector, teniendo en cuenta que para ello se utilizan  $2^n$ , Se lleva a cabo una simulación en Matlab, permitiendo visualizar el frente de onda de configuraciones en modo *Phased Array* con 4, 8 y 16 piezo-actuadores, 2 cm de separación o *pitch* entre ellos y una inclinación de  $45^\circ$ .

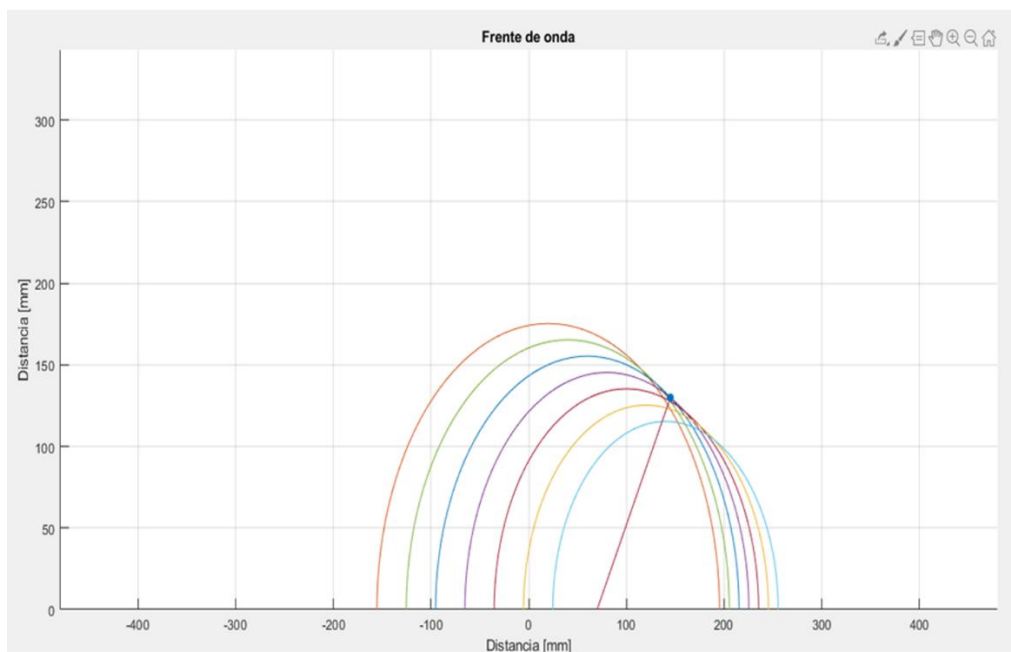
**Figura 13**

*Simulación Phased Array con 4 piezoeléctricos*

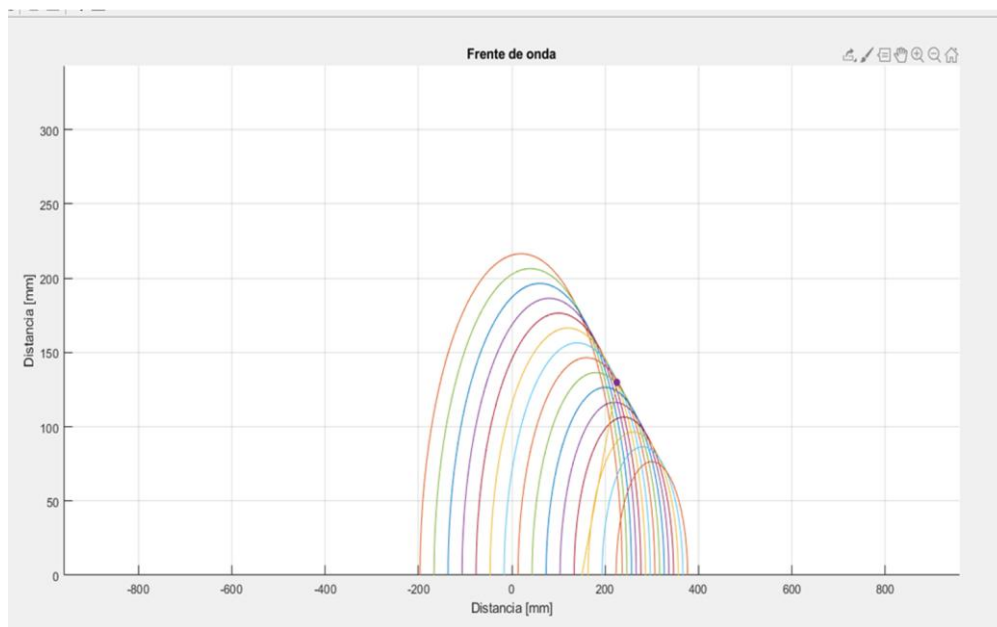


**Figura 14**

*Simulación Phased Array con 8 piezoeléctricos*

**Figura 15**

*Simulación Phased Array con 16 piezoeléctricos*



Como se puede observar en la Figura 14, el frente de onda no se logra formar con solo 4 piezo-actuadores. En las Figuras 15 y 16 se puede observar que se forma un frente de onda direccionado a 45 grados. Sin embargo, utilizar 16 piezo-actuadores limita el experimento, debido a que la cantidad de piezos en laboratorio es de 16 y éstos son consumibles, es decir que pueden dañarse en el proceso. Por ende, se elige un arreglo lineal de 8 piezo-actuadores, cumpliendo con las reglas y limitaciones en el diseño.

### 3.2 Secuencia de disparo para formar el frente de onda

Después de seleccionar la configuración más adecuada para implementar el sistema *Phased Array*, se determina la secuencia de disparo de los piezo-actuadores para tres diferentes ángulos: 30°, 45° y 60°. Esta secuencia se determina con la ecuación (2.18), obteniendo los valores de la Tabla 1. Es decir que si deseamos enviar un frente de onda con una inclinación de  $\vartheta=30^\circ$ , cada piezo-eléctrico debe estar desfasado 6,96  $\mu\text{s}$  respecto al de la posición anterior. Esto es independientemente a que frecuencia se excite el piezo-actuador.

**Tabla 1**

*Tiempo de disparo de cada piezo-actuador para diferentes ángulos*

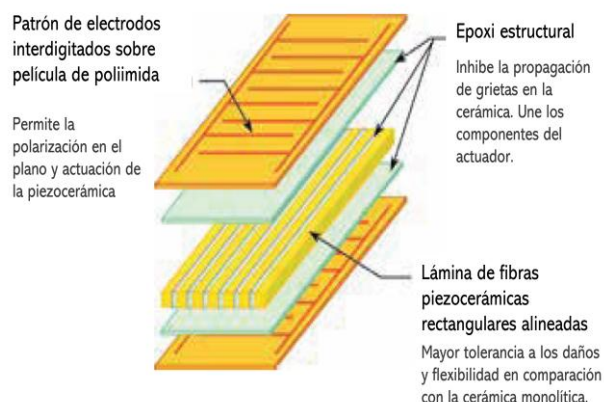
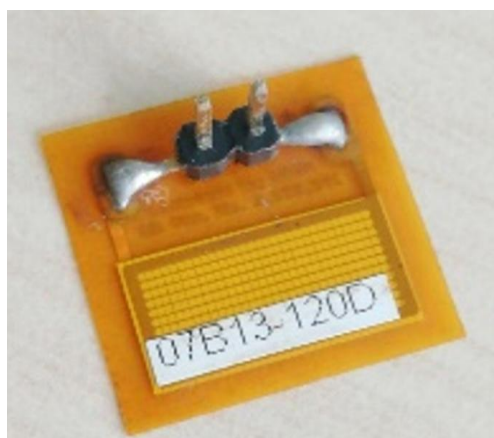
Piezoeléctrico	Tiempo para 30° ( $\mu\text{s}$ )	Tiempo para 45° ( $\mu\text{s}$ )	Tiempo para 60° ( $\mu\text{s}$ )
1	6,96	9,85	12,07
2	13,93	19,71	24,14
3	20,90	29,56	36,21
4	27,87	39,42	48,28
5	34,84	49,27	60,35
6	41,81	59,13	72,42
7	48,78	68,98	84,49

### 3.3 Caracterización de los piezo-actuadores

Para el experimento se utilizan piezo-eléctricos MFC0714P2 (Figura 16). Los MFC son piezo-eléctricos rectangulares compuestos por fibras cerámicas intercaladas entre sí. Al tratarse de láminas, su característica principal es la capacidad de ser moldeados de acuerdo la superficie donde se apliquen, estos pueden soldarse o incrustarse a la estructura. Sus especificaciones técnicas más importantes se pueden observar en la Tabla 2.

**Figura 16**

*Piezo eléctrico Micro Fiber Composite (MFC)*



**Tabla 2**

*Características MFC0714P2*

Parámetro	Valor
Voltaje operacional máximo positivo	360V
Voltaje operacional máximo negativo	-60V
Ancho de banda operativo	0 a 750kHz
Deformativo unitaria por voltio	1.1 – 1.3ppm/V

Cada piezo-eléctrico funcionan diferente el uno a otro, tanto la transmisión de la señal como en la recepción. Es decir que, si excitan con el mismo voltaje cada piezo, cada uno reacciona de manera individual, generando una onda de ultrasonido más fuerte que en el otro. Es por esto

que se realiza una caracterización, sometiendo a cada piezo-actuador a las mismas condiciones. Esto se realiza enfrentando a un piezo que funciona como emisor y otro como receptor. El emisor permanece fijo, transmitiendo una señal sinusoidal con una amplitud de 14.62 dBu a 69 kHz. Al otro lado de la tubería, obteniendo los datos de la Tabla 3

### Figura 17

*Pruebas de caracterización de los MFC0714P2*



**Tabla 3**

*Amplitud recibida por los piezoeléctricos*

Referencia Piezoeléctrico	Recepción [dBu]
080D	-13.92
078D	-24.03
086D	-20.43

093D	-18.59
S	-17.88
1	-17.66
2	-11.80
097D	-20.37
076D	-19.56
092D	-20.82

### 3.4 Configuración experimental de los piezoeléctricos para modo *Phased Array*

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de los piezo-actuadores, se organiza el vector en modo *Phased Array* en la secuencia mostrada en la Tabla 4. Los elementos que recibieron con mayor potencia la señal se utilizan como Receptores en el modelo de estimación.

**Tabla 4**

*Secuencia establecida de los piezoeléctricos*

Referencia Piezoeléctrico	Posición [dBu]
092D	0
097D	1
076D	2
086D	3
093D	4
078D	5
S	6
1	7
2	Sensor

### 3.5 Obtención de la respuesta en frecuencia de los piezoeléctricos

La frecuencia de resonancia de los piezoeléctricos M0714P2 depende de dos factores principales: el material al que están adheridos y su comportamiento como una carga resistiva-capacitiva. Este último implica que, a medida que aumenta la frecuencia, el voltaje tiende a disminuir. En este caso, se aplica una señal senoidal de 4 Vpp para excitar los piezoeléctricos. Por esta razón, es necesario realizar un barrido de frecuencias en el rango de 10 kHz a 700 kHz, utilizando dos piezoeléctricos: uno como actuador y otro como sensor, ambos posicionados sobre la tubería utilizada. El objetivo de este procedimiento es identificar la frecuencia en la que el sensor logra captar la señal de manera óptima. En la Tabla 5, se puede observar cómo se comporta el emisor a medida que aumenta la frecuencia, y que el Voltaje pico a pico de este va disminuyendo. Cabe resaltar en la prueba que a partir de 80 kHz se distorsiona la señal enviada.

**Tabla 5**

*Barrido en frecuencia en el transmisor*

Frecuencia [kHz]	Toma 1 [Vpp]	Toma 2 [Vpp]	Toma 3 [Vpp]	Promedio [Vpp]
10	3.717	3.717	3.717	3.717
20	3.181	3.181	3.165	3.176
30	2.646	2.646	2.630	2.641
40	2.223	2.224	2.216	2.221
50	1.889	1.890	1.859	1.879
60	1.530	1.528	1.529	1.529
70	1.480	1.480	1.471	1.477
80	1.293	1.292	1.291	1.292
90	1.166	1.166	1.165	1.166
100	1.051	1.046	1.039	1.045
200	0.634	0.634	0.643	0.637
300	0.462	0.462	0.461	0.462
400	0.327	0.327	0.326	0.327
500	0.252	0.252	0.254	0.253
600	0.215	0.213	0.218	0.215

Como se mencionó anteriormente, el voltaje pico a pico en el receptor se observa de manera significativa solo hasta 100 kHz, lo que permite evitar la presencia de armónicos no deseados en la señal sensada. Además, en la Tabla 6, se puede apreciar que alrededor de los 70 kHz el voltaje pico a pico sensado presenta un incremento notable.

**Tabla 6**

*Barrido de frecuencia en el receptor*

Frecuencia [kHz]	Toma 1 [mVpp]	Toma 2 [mVpp]	Toma 3 [mVpp]	Promedio [Vpp]
10	310	492	392	398
20	492	551	523	522
30	720	710	715	715
40	510	717	648	625
50	758	701	731	730
60	803	1331	1322	1152
70	402	1940	1530	1424
80	112	590	684	462
90	248	305	409	321
100	533	495	433	487

Ahora se hace un barrido de frecuencia desde 55 kHz hasta 75 kHz con el fin de acotar las frecuencias donde posiblemente haya una mejor respuesta del sistema, y se obtiene que la mejor frecuencia para utilizar los MFC0714P2 es la de 69 kHz.

**Tabla 7**

*Barrido en frecuencia en un rango más cercano donde se percibe la señal recibida una mayor amplitud*

Frecuencia [kHz]	Amplitud [mVpp]	Frecuencia [kHz]	Amplitud [Vpp]
55	951	69	2223
65	1717	68	2157
75	1380	67	1980

### 3.6 Optimización de la generación de señales de excitación

Después de caracterizar el sistema entre los transductores piezoeléctricos y la tubería de acero-carbono, mediante un barrido en frecuencia para determinar la frecuencia óptima de operación, se obtuvo que la mejor frecuencia de emisión es de 69 kHz, con un periodo de 14.49  $\mu$ s. Posteriormente, se calcularon los tiempos de desfase de cada uno de los transductores del arreglo vectorial *Phased Array* para tres ángulos de incidencia:  $\vartheta = 30^\circ$ ,  $\vartheta = 45^\circ$  y  $\vartheta = 60^\circ$ .

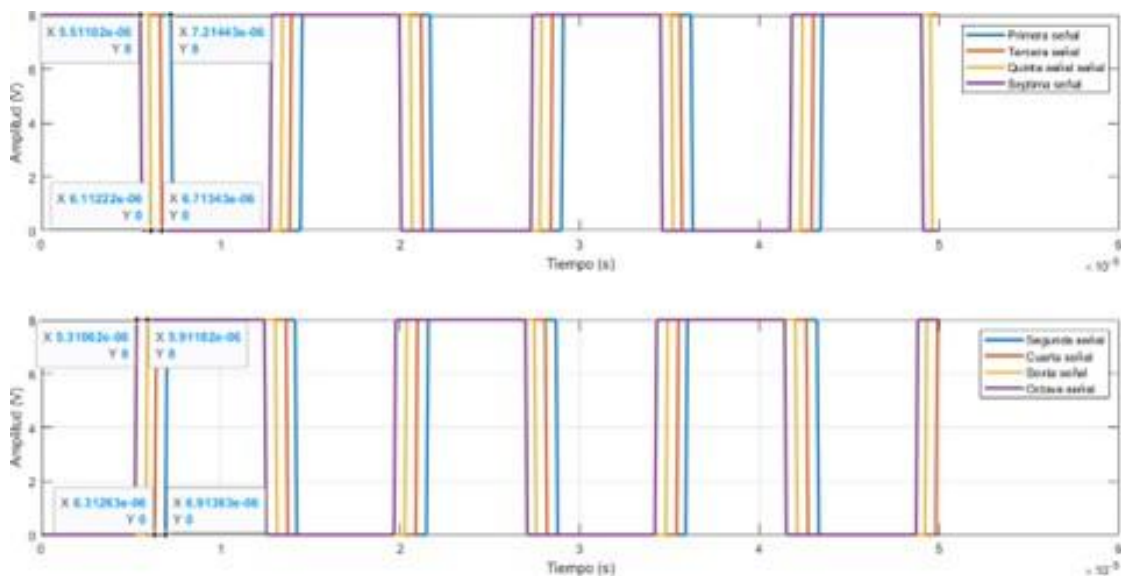
En la simulación realizada en Matlab, que representa las 8 ondas emitidas por los piezo-actuadores a dicha frecuencia (Figuras 18, 19, 20), se observó que algunas señales coincidían entre sí o presentaban diferencias de desfase muy pequeñas respecto a otras. Por esta razón, para evitar generar 8 señales desfasadas innecesarias correspondientes al total de transductores del arreglo, se decidió omitir aquellas señales que coincidían o cuya diferencia de desfase en tiempo era muy mínima.

Para los ángulos de incidencia se generarán las siguientes señales de control:

- Para  $\vartheta = 30^\circ$ : Se generarán 2 señales de control.
- Para  $\vartheta = 45^\circ$ : Se generarán 3 señales de control.
- Para  $\vartheta = 60^\circ$ : Se generarán 4 señales de control.

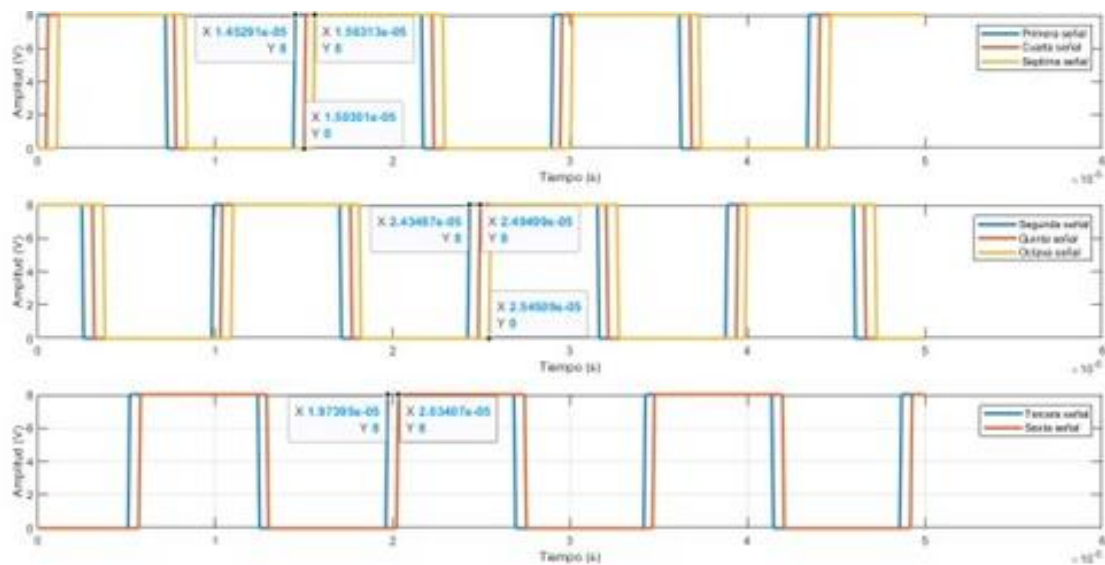
**Figura 18**

*Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 30°*



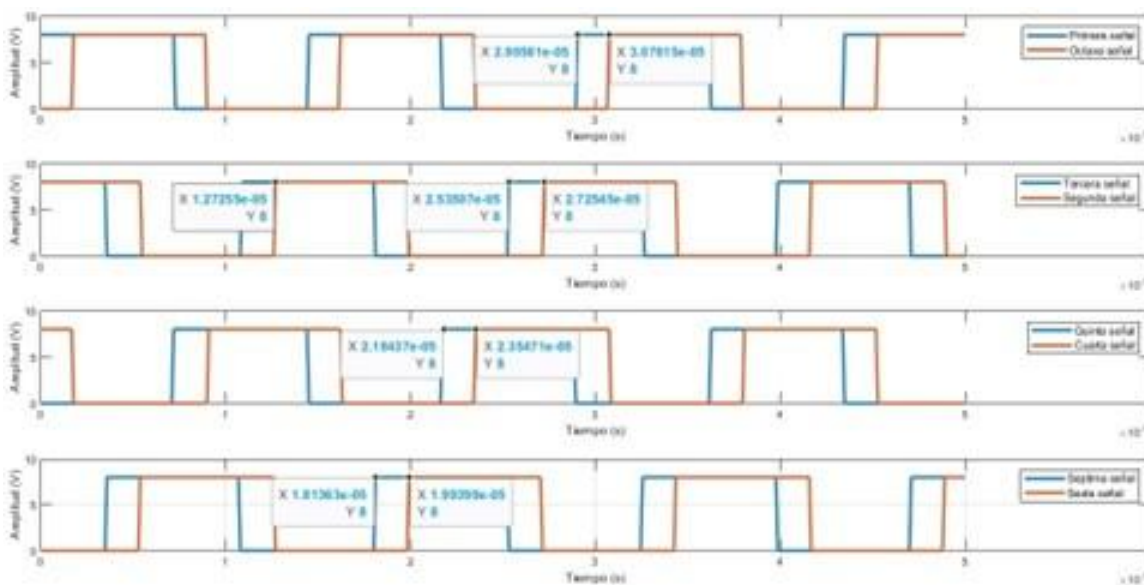
**Figura 19**

*Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 45°*



**Figura 20**

*Simulación desfase de los 8 piezo-actuadores para 60°*



### 3.7 Configuración electrónica de las Secuencias de Activación de los piezoeléctricos para generar el modo Phased Array

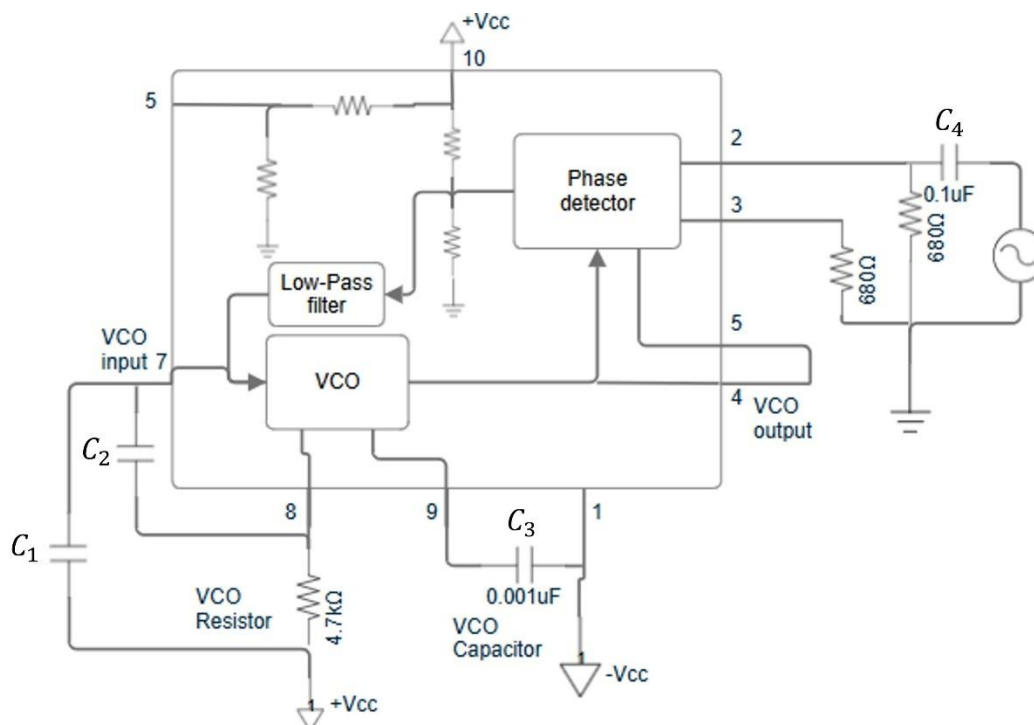
Para desfasar una señal sinusoidal, es común utilizar amplificadores operacionales o filtros pasa-bajas. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones en la amplificación, ya que no alcanzan la amplitud necesaria para excitar el material piezoeléctrico de manera eficiente. Dado que gran parte de la señal emitida se refleja en el material de la tubería (acero al carbono), es crucial emitir la señal con la mayor amplitud de voltaje posible.

Por esta razón se decide amplificar una señal cuadrada mediante conmutaciones de un transistor de alta potencia y de alta frecuencia. Más adelante se muestra el diseño electrónico de la amplificación de la señal de control. 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  $C_2$  (Figura 21), se puede observar un desfase en la señal de salida del VCO (Voltage-Controlled Oscillator) con respecto a la señal de entrada.

**Figura 21**

*Esquema eléctrico PLL*

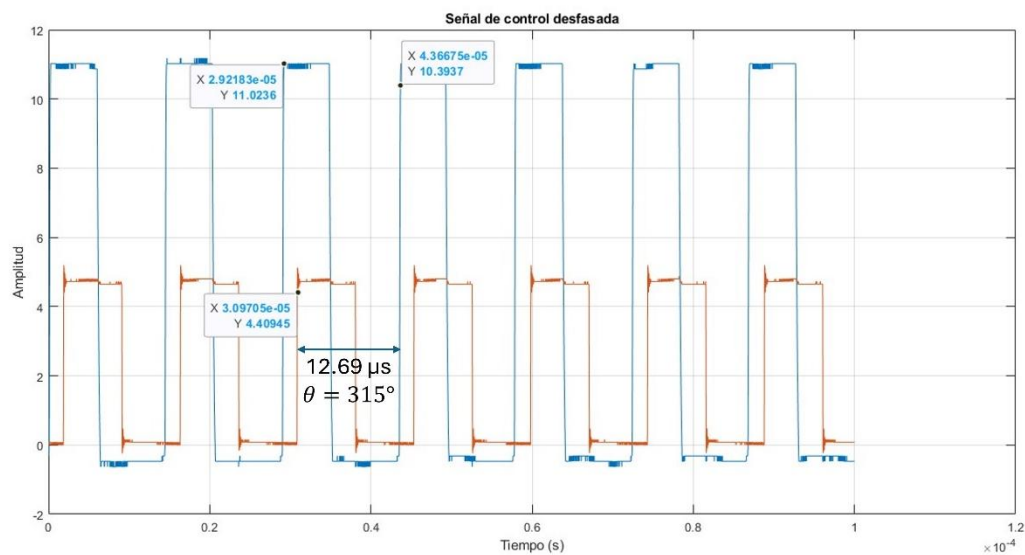


El IC565 se configura de manera que la frecuencia central del VCO, o frecuencia libre del PLL, se establezca aproximadamente en 69 kHz. Este valor se ajusta mediante una resistencia variable,  $R_1$ . De esta forma, se obtiene una señal de referencia proporcionada por el generador de señales y una señal desfasada generada a partir del PLL.

La implementación del PLL IC565 permite un control del desfase, asegurando que la señal amplificada alcance la amplitud requerida para la excitación eficiente del material piezoeléctrico. Este enfoque garantiza una mayor eficacia en la emisión de la señal, minimizando las pérdidas por reflexión en la tubería de acero al carbono y mejorando el rendimiento general del sistema.

**Figura 22**

Desfase del PLL con  $C_2 = 1 \text{ nF}$



Sabiendo que el periodo de la señal es de  $14.49 \mu\text{s}$  y variando el valor de la capacitancia de  $C_2$ , se observa que para  $C_2 = 3 \text{ nF}$  se obtiene un desfase de  $\vartheta = 84.5^\circ$ , aproximadamente la mitad del desfase requerido para una señal con un ángulo de incidencia  $\theta = 30^\circ$  ( $\vartheta = 173^\circ$ ). Por lo tanto, se requieren dos etapas de PLL en serie para alcanzar el desfase deseado.

Con  $C_2 = 1 \text{ nF}$ , se obtiene un desfase de  $\vartheta = 232.4^\circ$ , que se aproxima al desfase para el ángulo de incidencia  $\theta = 45^\circ$  ( $\vartheta = 244.7^\circ$ ). Para  $C_2 = 2 \text{ nF}$ , el desfase de la señal en el PLL es de  $\vartheta = 315.3^\circ$ , lo que se aproxima al desfase del ángulo de incidencia  $\theta = 60^\circ$  ( $\vartheta = 300^\circ$ ).

**Tabla 8**

Desfase producido y requerido variando la capacitancia de  $C_2$

Capacitancia $C_2$ (nF)	Desfase producido ( $^\circ$ )	Desfase requerido ( $^\circ$ )
3	84.5	173.0
1	232.4	244.7
2	315.3	300.0

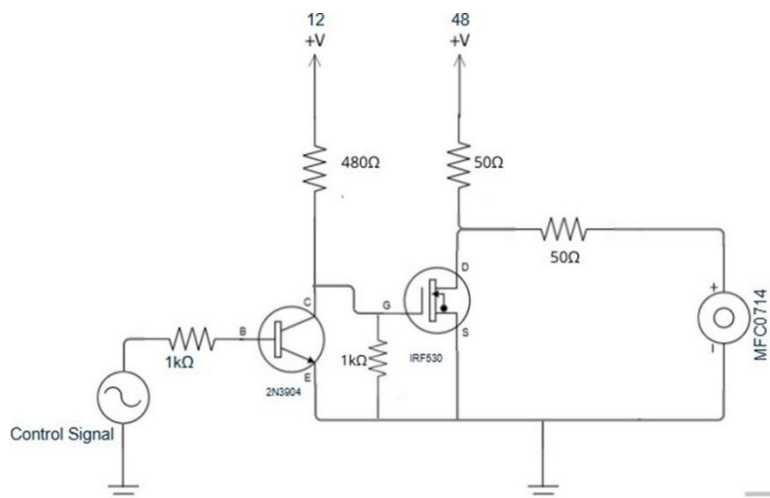
Una vez desfasada la señal, esta pasa por una etapa de amplificación, donde la señal desfasada actúa como la señal de control en la puerta del transistor ( $V_{GS}$ ).

### 3.8 Amplificación de las señales de excitación

El circuito implementado es un excitador para el transductor piezoeléctrico (MFC0714) que amplifica una señal de control y genera las vibraciones mecánicas. (Figura 23) 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 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 de alta potencia y de alta frecuencia.

#### Figura 23

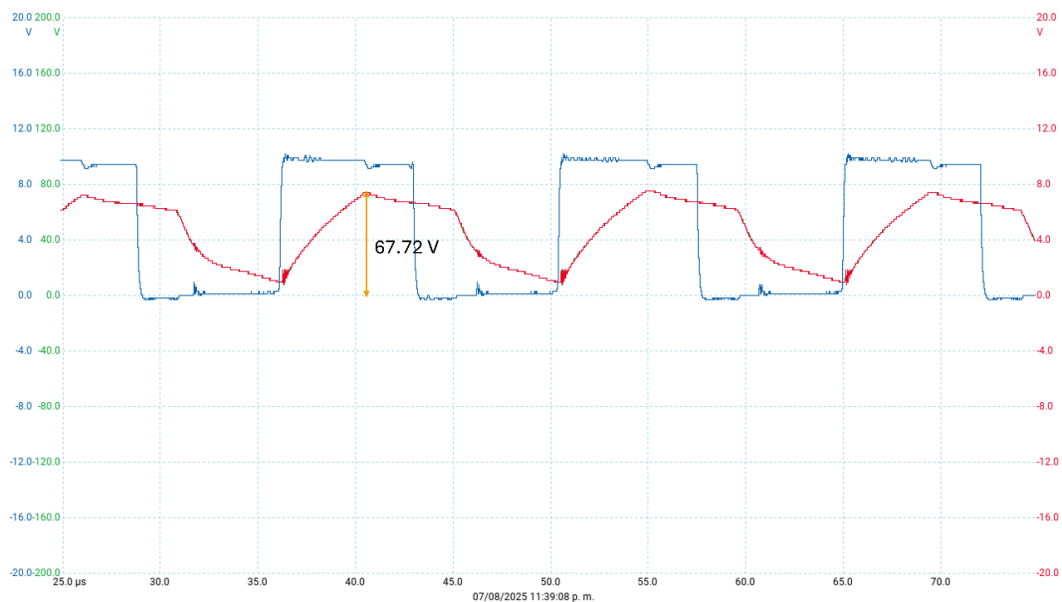
*Circuito de la etapa de amplificación*



**Tabla 9***Características del MOSFET IRF530*

Parámetro	Valor
Tipo	N-Channel MOSFET
Tensión $V_{DS}$	100 V
Corriente de drenador $I_D$	14 A
Tensión de compuerta-fuente $V_{GS(on)}$	10 V
Frecuencia de conmutación	Hasta 100 kHz

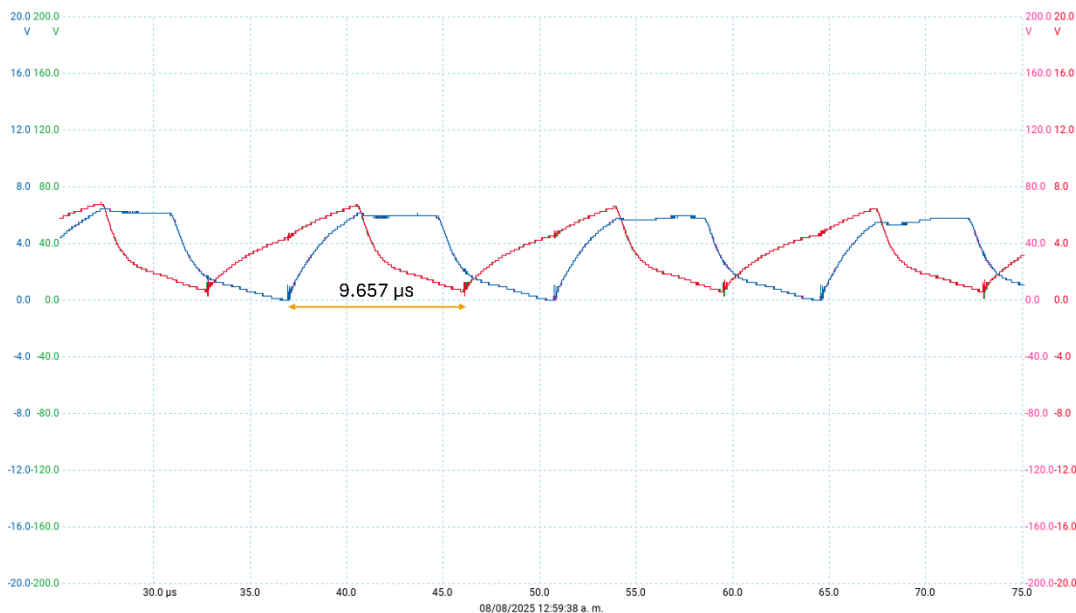
En la Figura 24 se pueden observar dos señales. La señal azul corresponde a la señal de control, que tiene una frecuencia de 69 kHz, una amplitud de 10 V y un ciclo de trabajo del 50%. La señal roja, medida desde el canal B, es una señal amplificada con la misma frecuencia de 69 kHz, pero con una amplitud de 67.72 Vpp. Es importante destacar que el canal B está configurado con un factor de multiplicación de  $\times 10$ times, esto es necesario debido a que el límite de voltaje medible por el osciloscopio es de  $\pm 20V$ .

**Figura 24***Señal amplificada medida con 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 67.72 Vpp y 61.42 Vpp respectivamente. (Figura 25)

### Figura 25

*Señales amplificadas con desfase*



### 3.9 Validación experimental de los ángulos de disparo del Phased Array

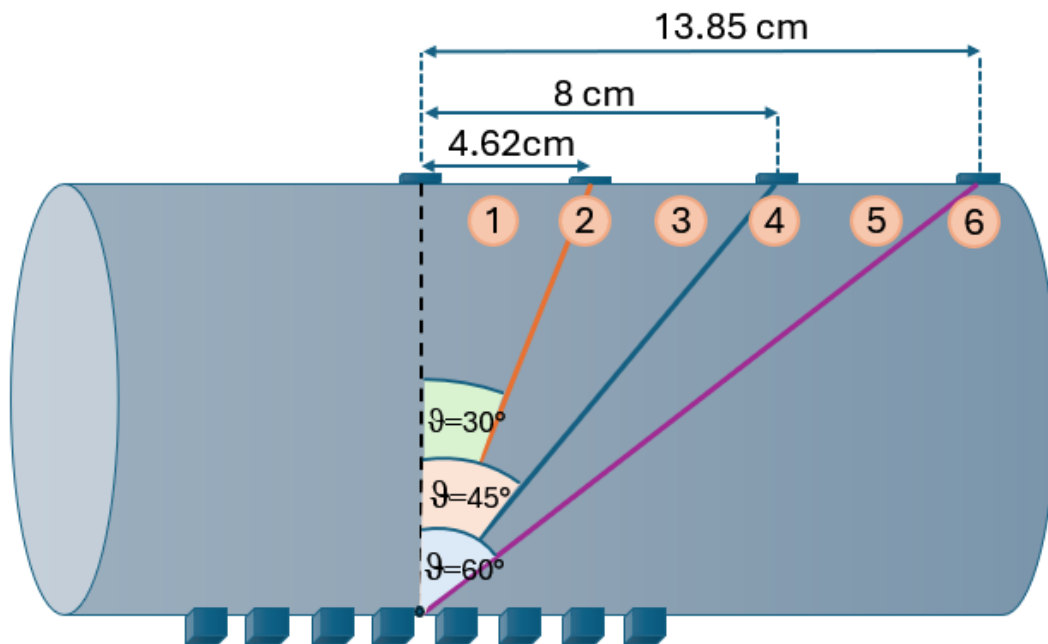
Para verificar la inclinación del frente de onda, se posiciona un sensor en el lado opuesto al arreglo vectorial. La distancia desde el eje central del arreglo hasta la apertura del ángulo se calcula aplicando la ley de los senos. El análisis del frente de onda se realiza para tres ángulos de inclinación:  $\vartheta_1 = 30^\circ$ ,  $\vartheta_2 = 45^\circ$  y  $\vartheta_3 = 60^\circ$ .

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. Dichos sensores están

opuestos al arreglo vectorial como se observa en la Figura 26. La posición 2 coincide con la distancia de apertura del ángulo de  $\vartheta_1 = 30^\circ$ , la posición 4 con la de  $\vartheta_2 = 45^\circ$ , y la posición 6 con la de  $\vartheta_3 = 60^\circ$ .

### Figura 26

*Posiciones de los sensores para verificar el ángulo de inclinación - esquema*



Se debe aclarar que el frente de onda no tiene gran capacidad de dirección debido al tamaño de los elementos que conforman el arreglo vectorial y el diámetro de la tubería, por lo tanto, lo que se propaga es una región que contienen ondas-ultrasonicas.

**Figura 27**

*Arreglo de piezo-eléctrico sobre la tubería de acero*



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 de 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  $30^\circ$ , la posición 4 con la de  $45^\circ$ , y la posición 6 con la de  $60^\circ$ , según se presenta en las Tablas 10, 11 y 12.

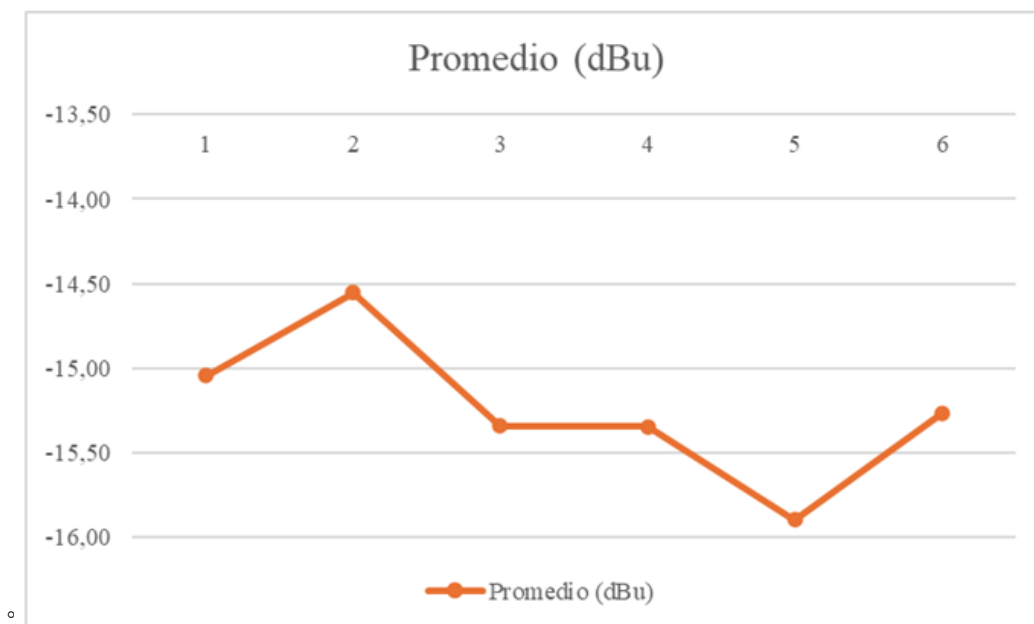
**Tabla 10**

*Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de  $\vartheta = 30^\circ$*

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	-15.85	-15.85	-16.00	-15.90
6	-15,20	-15,17	-15,22	-15.22	-15.49	-15.26

**Figura 28**

*Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de  $\vartheta_1 = 30^\circ$*



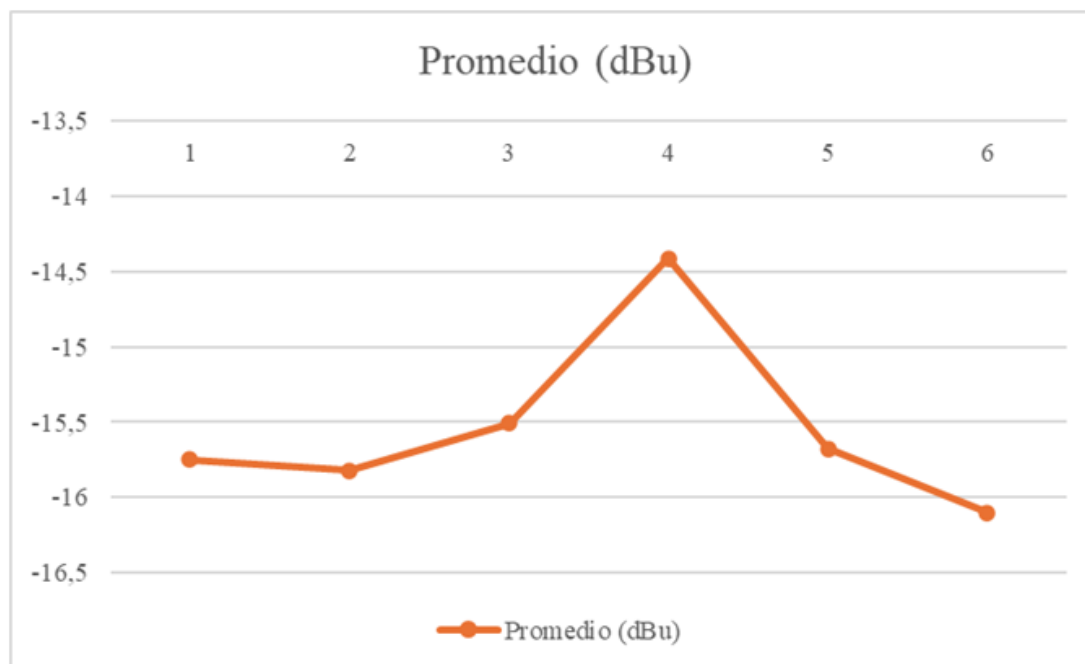
**Tabla 11**

*Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de  $\vartheta_1 = 45^\circ$*

Posición	Prueba 1 [dBu]	Prueba 2 [dBu]	Prueba 3 [dBu]	Prueba 4 [dBu]	Prueba 5 [dBu]	Promedio [dBu]
1	-15,29	-15,50	-15,83	-16,16	-15,97	-15,75
2	-15,99	-15,90	-14,73	-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	-14,41
5	-15,97	-15,72	-15,61	-15,47	-15,61	-15,67
6	-15,66	-16,05	-16,45	-16,35	-15,99	-16,10

**Figura 29**

*Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de  $\vartheta_1 = 45^\circ$*

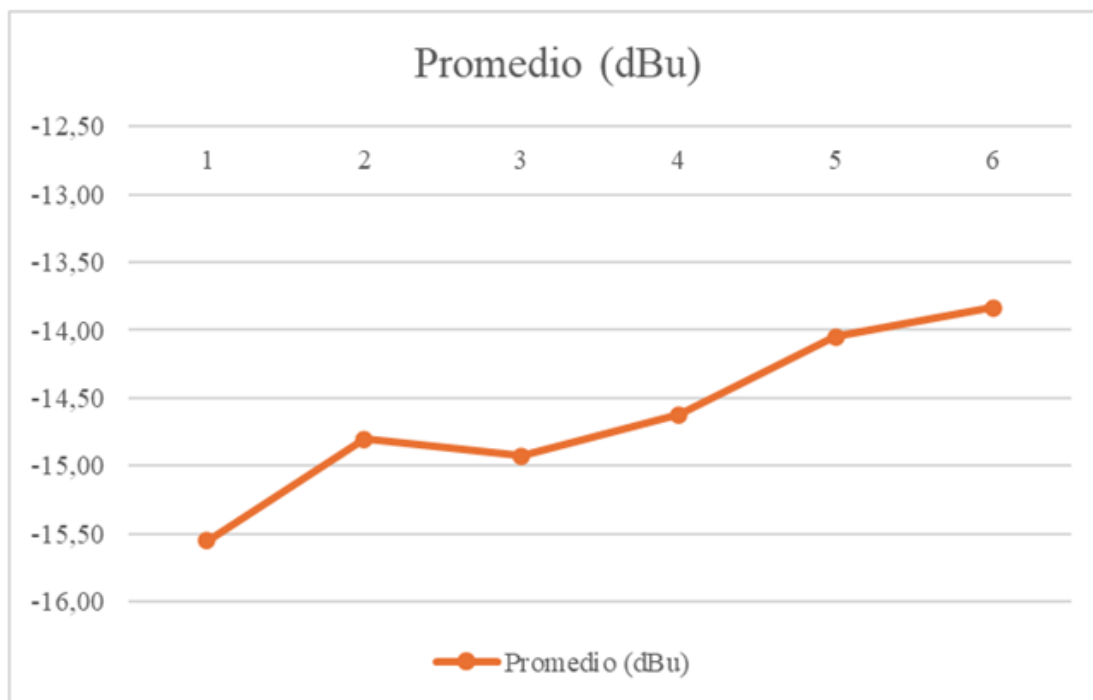


**Tabla 12**

*Amplitud de la señal recibida por el sensor en las diferentes posiciones para el arreglo de  $\vartheta = 60^\circ$*

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

**Figura 30** *Posición vs Promedio de la amplitud del pico más alto de la señal de recepción en cada posición para un ángulo de incidencia de  $\vartheta_1 = 60^\circ$*



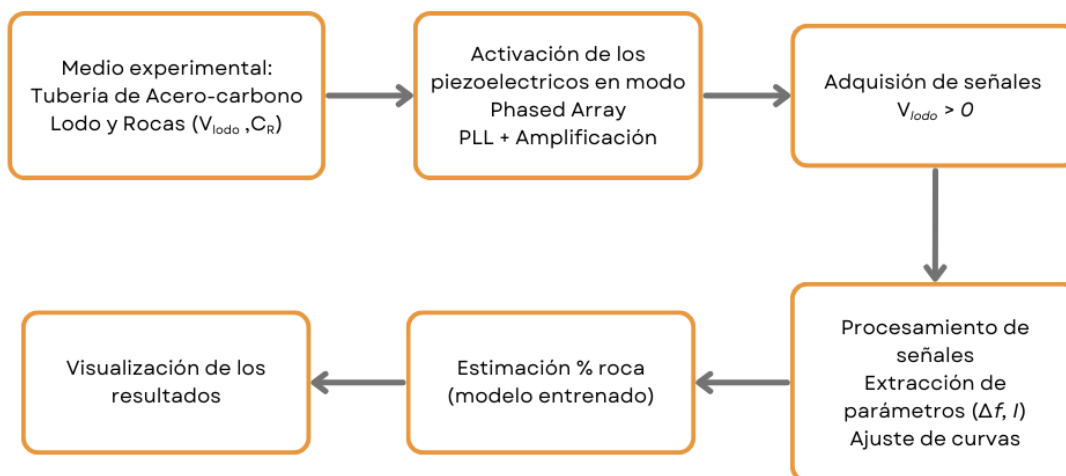
Cuando el arreglo *Phased Array* se configura para emitir el frente de onda a un ángulo de  $30^\circ$ , se observa en la Figura 28 una variación en la amplitud de la señal, siendo mayor en la posición 2, que corresponde a la distancia asociada con la apertura angular de  $\vartheta_1 = 30^\circ$ . Este mismo comportamiento se repite en las Figuras 29 y 90 para los ángulos de  $\vartheta_2 = 45^\circ$  y  $\vartheta_3 = 60^\circ$ . 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.

#### 4. Modelo de estimación propuesto

A continuación, se presenta un diagrama de bloques que describe el proceso seguido para el entrenamiento del algoritmo, con el fin de generar un modelo de estimación del flujo (Figura 31)

**Figura 31**

*Diagrama de bloques del proceso de entrenamiento del modelo de estimación de flujo volumétrico de rocas*



##### 1. Medio experimental: Tubería de acero-carbono, lodo y rocas ( $V_{lodo}, C_R$ )

Representa el entorno físico en el cual se realizan las pruebas controladas. En la tubería circula una mezcla de lodo de perforación con diferentes concentraciones de roca. El caudal del lodo ( $V_{lodo}$ ) y la concentración de roca ( $C_R$ ) constituyen las variables de entrada principales del sistema.

##### 2. Activación de los piezoeléctricos en modo Phased Array, PLL + Amplificación

Este bloque incluye el sistema electrónico encargado de la excitación ultrasónica. A partir de un generador de señales controlado en fase (PLL) y un arreglo de transductores piezoeléctricos en configuración *Phased Array*, se emite la señal hacia la tubería, amplificada para garantizar una adecuada transmisión de energía al medio experimental.

### 3. Adquisición de señales ( $V_{\text{lodo}} > 0$ )

Corresponde al registro de las señales ultrasónicas transmitidas y recibidas por los sensores piezoeléctricos. La adquisición se realiza mientras existe flujo de lodo en la tubería ( $V_{\text{lodo}} > 0$ ), utilizando el osciloscopio digital (PicoScope) para almacenar las formas de onda en el dominio del tiempo.

### 4. Procesamiento de señales: Extracción de parámetros ( $\Delta f$ , $I$ ) y ajuste de curvas

En esta etapa se procesan las señales adquiridas aplicando algoritmos en Matlab. Se extraen los parámetros característicos:

- $\Delta f$ : diferencia de frecuencias (efecto Doppler).
- $I$ : índice de transmisión (relación de amplitudes).

Posteriormente, se realiza un ajuste de curvas para establecer las relaciones entre los parámetros medidos y la concentración de roca en la mezcla, generando 2 modelos de estimación.

### 5. Estimación % roca (modelo entrenado)

Una vez obtenidos los parámetros característicos, se entrena un modelo matemático de estimación. El modelo asocia los valores de  $\Delta f$  e  $I$  con las concentraciones de roca observadas experimentalmente, permitiendo generar dos modelos diferentes predicen el porcentaje de roca en el flujo de lodo.

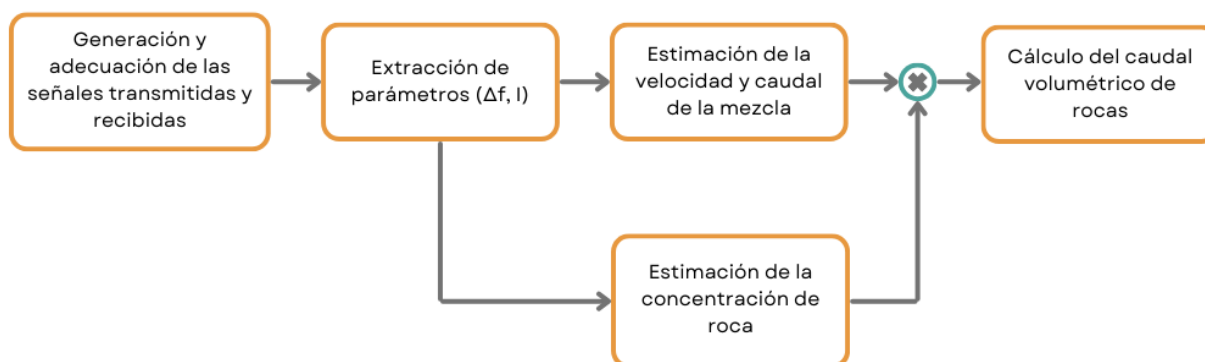
## 6. Visualización de los resultados

Finalmente, los resultados de la estimación se presentan en una interfaz gráfica. Esta etapa facilita la interpretación de los datos y la comparación entre los valores reales de concentración y los obtenidos por el modelo entrenado.

Ahora, se presenta un diagrama de bloques que describe el proceso de operación en línea del modelo, utilizado para la estimación del caudal volumétrico de rocas a partir de las señales ultrasónicas adquiridas y procesadas. (Figura 32)

### Figura 32

*Diagrama de bloques del proceso de operación en línea del modelo de estimación de caudal volumétrico de rocas.*



#### 1. Generación y adecuación de las señales transmitidas y recibidas

Incluye la emisión de señales ultrasónicas mediante el arreglo piezoeléctrico y la adecuación de las formas de onda recibidas para garantizar que estén en condiciones de ser procesadas.

#### 2. Extracción de parámetros ( $\Delta f$ , $I$ )

A partir de las señales adquiridas, se calculan los parámetros característicos: la variación de frecuencia ( $\Delta f$ ) asociada al efecto Doppler y el índice de transmisión ( $I$ ) obtenido de la relación de amplitudes.

### 3. Estimación de la velocidad y caudal de la mezcla

Con el parámetro  $\Delta f$  se determina la velocidad del flujo y, en consecuencia, el caudal volumétrico total de la mezcla (lodo + roca).

### 4. Estimación de la concentración de roca

A partir de los parámetros  $\Delta f$  e  $I$ , se pueden estimar el porcentaje de roca presente en la mezcla, para cada uno de los dos modelos entrenados.

### 5. Cálculo del caudal volumétrico de rocas

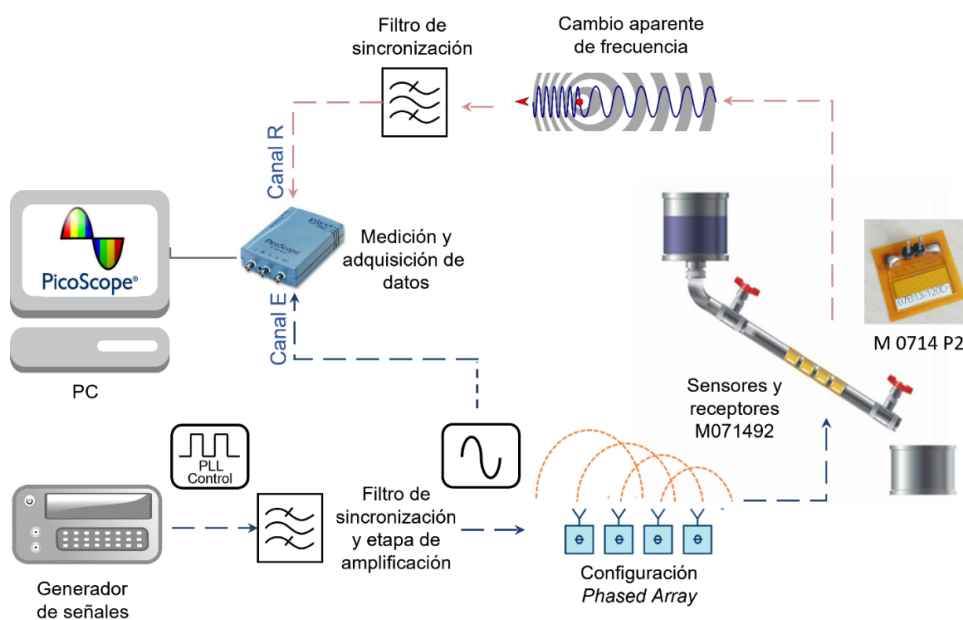
Finalmente, combinando el caudal volumétrico total de la mezcla y la concentración estimada de roca, se obtiene el caudal volumétrico específico de la fase sólida (rocas), que constituye la salida principal del modelo.

## 5. Diseño del Sistema experimental

En esta sección, se presenta el diseño experimental a nivel de laboratorio para la estimación del flujo de cortes y derrumbes de perforación (Figura 33). El sistema consiste en un tanque inicial que contiene el lodo de perforación y rocas de distintos tamaños organizadas según sus concentraciones. El fluido y las rocas se desplazan a través de una tubería de acero al carbono de 2 mm de espesor, controlada por una válvula que regula el flujo. Finalmente, la mezcla de lodo y rocas se deposita en una bandeja de recepción.

**Figura 33**

*Sistema general del experimento para la estimación de cortes y derrumbes*



## 5.1 Propiedades del lodo y concentraciones de roca

Para llevar a cabo el experimento se prepara un lodo en base agua preparado por el Instituto Colombiano del Petróleo en uno de sus laboratorios de lodo. Los principales componentes del lodo utilizado están en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Propiedades del lodo experimental*

Producto	Tipo de Material	Gravedad específica (GE)	Concentración (lb/bbl)	Cantidad a usar (lb)	Cantidad a usar (g)	Volumen ocupado( $cm^3$ )	Volumen ocupado (L)
Bentonita	Arcilla	2.60	13.13	1.65	749.46	288.25	0.29
Clayseal Plus	Inhibidor	0.90	3.70	0.47	211.08	234.53	0, 23
PAC L	Controlador	1.50	6.06	0.76	345.90	230.60	0, 23
Glutaraldehído	Biosida	1.00	0.50	0.06	28.57	28.57	0, 03
Agua	Base	1.00	Requerida	N/A	N/A	9218	9.22

Se variaron dos parámetros relacionados con la roca: el primero fue la concentración de roca en el lodo preparado (10 L) y segundo, el nivel de concentración: baja, media, alta y muy alta. Se usan piedras mayores a 2 cm por la longitud de onda al enviar la señal a 69 kHz. Se pesan las rocas y se separa por masa para posteriormente hacer las pruebas de laboratorio en diferentes concentraciones de roca en el lodo, desde muy baja hasta muy alta. Estas concentraciones se evidencian en la Tabla 14.

**Figura 34***Cantidad de rocas para concentración alta***Tabla 14***Concentraciones de la roca experimental*

Concentración de roca	Concentración de roca (%)	Masa(g)	Masa(kg)
Baja	0.411	42	0.042
Media	0.818	84	0.084
Alta	1.356	140	0.14
Muy alta	2.676	280	0.28

## 5.2 Cálculo del caudal y velocidad del lodo

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 tubería al abrir la válvula a 1/4 de su apertura total (Figura 35). El lodo pasa por una sección transversal del tubo de  $0.00023 \text{ m}^2$ . El procedimiento se repite tres veces para calcular la velocidad del lodo y para cada una de las concentraciones de roca propuestas para el experimento.

### Figura 35

*Sistema de circulación de lodo experimental*



**Tabla 15***Caudal y velocidad a partir del tiempo de vaciado*

Prueba	Datos adquiridos		Datos calculados	
	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo (s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad (m/s)
1	0.01	20.78	0.0004813	2.0927
2	0.01	21.03	0.0004756	2.0678
3	0.01	22.03	0.0004645	2.0745
4	0.01	20.10	0.0004972	2.1385
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 que tarda en caer los 10 L de lodo y rocas desde el tanque superior al tanque inferior, con la válvula abierta a 1/4. Mientras el lodo cae, se introducen las rocas con las concentraciones respectivas medidas previamente. Primero se realiza este proceso solo con el lodo, y la velocidad del lodo en cada prueba se puede observar en la Tabla 15.

Con ayuda del Picoscope, se miden señales en el tiempo dentro de una ventana de 10 ms y en frecuencia en una ventana de 0 a 992.1 kHz, con una velocidad de muestreo 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 se realizan para un ángulo de incidencia de  $\vartheta_2 = 45^\circ$ .

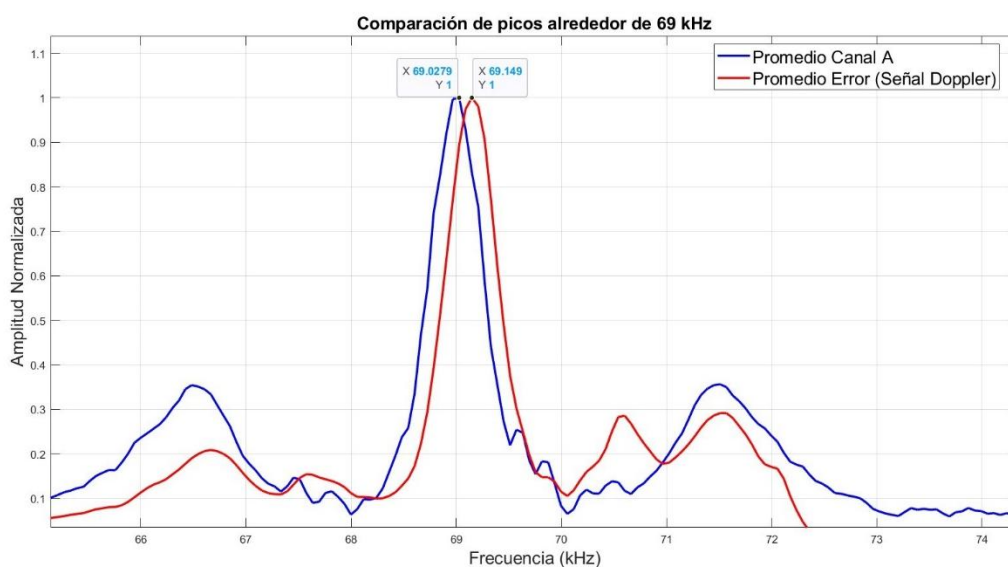
Para obtener la frecuencia Doppler, no es posible identificarla directamente como el pico más alto en el espectro de la señal recibida en comparación con la señal emitida por el sensor. Tal como se mencionó anteriormente, uno de los principales desafíos radica en que la señal transmitida tiende a propagarse 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 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 Figura 36. Este procedimiento se repite varias veces para las diferentes concentraciones de roca en el lodo, calculando las frecuencias Doppler correspondientes mediante procesamiento en MATLAB.

### Figura 36

*FFT de la señal enviada y recibida después de aplicar el filtro adaptativo LMS*



## 6. Resultados Experimentales

En este capítulo se evidencian los diferentes resultados obtenidos durante la experimentación y su respectivo análisis.

### 6.1 Estimación del flujo volumétrico de lodo y rocas

En esta prueba se busca encontrar la relación que hay en la frecuencia y la concentración de rocas que viaja a través de la tubería de acero-carbono. Para esto se utilizan los 10 L de lodo y cuatro diferentes concentraciones de rocas planteadas en la Tabla 14.

Con el arreglo *Phased Array* se realiza el experimento para  $\vartheta_2 = 45^\circ$  como ángulo del frente de onda. Gracias al Picoscope, se pueden tomar capturas de la FFT cada 0.5 s durante 30 s. Estas capturas se toman mientras la válvula está cerrada y luego abierta hasta desocupar todo el lodo y las rocas que hay en el tanque superior. A cada muestra tomada, se pasa por el filtro LMS y luego se analiza la frecuencia en el pico más alto y se calcula el promedio de todas las muestras tomadas durante el tiempo que dura el vaciado.

**Tabla 16**

*Cambio de la frecuencia observada para diferentes concentraciones de roca en el lodo*

Numero de prueba	Concentración (%)	Masa (g)	Frecuencia en el pico (Hz)	Delta de Frecuencia (Hz)	Promedio de frecuencias por masa (Hz)	Desviación (Hz)
1	0.411	42	69161	160	69164	11.76
2			69156	155		
3			69171	170		
4			69168	167		
5			69152	151		
6			69180	179		
1	0.818	84	69154	153	69156	9.67
2			69148	147		
3			69166	165		
4			69151	150		
5			69150	149		
6			69172	171		
1	1.356	140	69251	250	69229	29.38
2			69241	240		
3			69201	200		
4			69263	262		
5			69231	230		
6			69191	190		
1	2.676	280	69143	142	69143	3.71
2			69146	145		
3			69141	140		
4			69142	141		
5			69144	143		
6			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 (2.8), 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. (Tabla 16).

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 17 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 17**

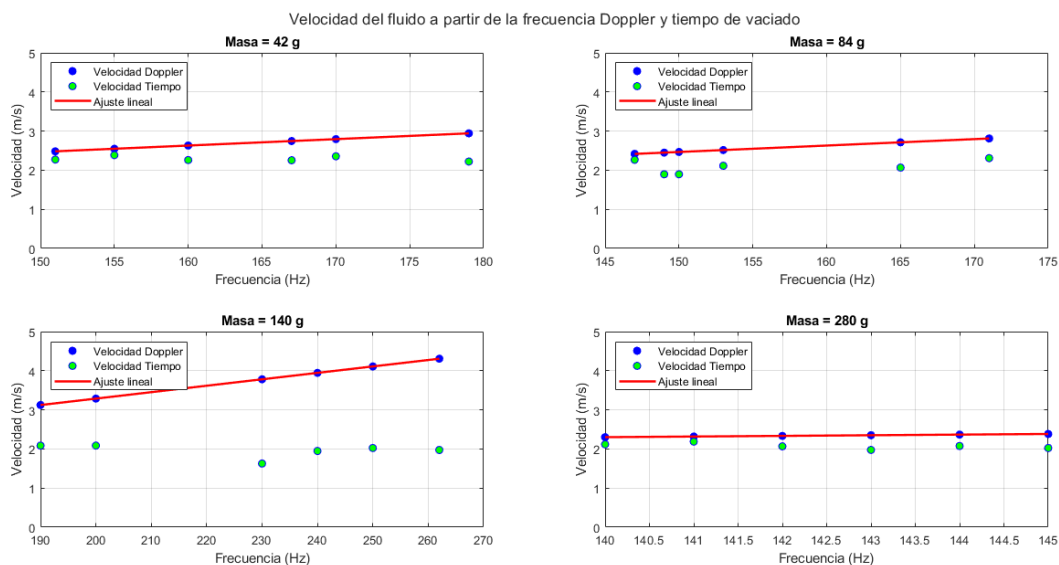
*Velocidades y caudales calculados a partir delta frecuencia Doppler y el tiempo de vaciado del tanque superior*

Concentración (%)	Masa (g)	Calculados con la frecuencia Doppler			Calculados con el tiempo de vaciado			Error %	Promedio Error%
		Delta f (Hz)	Vel. (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo (s)	Vel. (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
0.411	42	160	2.630	0.0006049	19.24	2.260	0.0005198	16.3815	18.7132
		155	2.548	0.0005856	18.23	2.385	0.0005485	6.8261	
		170	2.794	0.0006427	19.54	2.225	0.0005118	25.5834	
		167	2.745	0.0006314	19.29	2.254	0.0005184	21.7889	
		151	2.482	0.0005709	19.14	2.272	0.0005225	9.2642	
		179	2.942	0.0006767	19.57	2.222	0.0005110	32.4350	
0.818	84	153	2.515	0.0005784	20.58	2.113	0.0004859	19.0407	22.9782
		147	2.416	0.0005557	19.19	2.266	0.0005211	6.6476	
		165	2.712	0.0006238	21.03	2.067	0.0004755	31.1844	
		150	2.466	0.0005671	22.93	1.896	0.0004361	30.0332	
		149	2.449	0.0005633	22.93	1.896	0.0004361	29.1663	
1.356	140	171	2.811	0.0006465	18.84	2.308	0.0005308	21.7968	88.1057
		250	4.109	0.0009451	21.48	2.024	0.0004655	103.0173	
		240	3.945	0.0009073	22.32	1.948	0.0004480	102.5183	
		200	3.287	0.0007561	20.84	2.086	0.0004798	57.5747	
		262	4.307	0.0009905	22.02	1.974	0.0004541	118.1109	
		230	3.781	0.0008695	26.73	1.913	0.0004399	97.6451	
2.676	280	190	3.123	0.0007183	20.85	2.085	0.0004796	49.7678	13.0274
		142	2.334	0.0005368	21.03	2.067	0.0004755	12.8981	
		145	2.383	0.0005481	21.48	2.024	0.0004655	17.7501	
		140	2.301	0.0005293	20.53	2.118	0.0004871	8.6615	
		141	2.318	0.0005331	19.87	2.188	0.0005033	5.9195	
		143	2.351	0.0005407	22.00	1.976	0.0004545	18.9372	
		144	2.367	0.0005444	20.94	2.076	0.0004776	13.9982	

En la figura 37 se puede observar las gráficas de las velocidades en las seis pruebas hechas por concentración, siendo la concentración de 2.676% la que menos se ajustan las velocidades estimadas a partir de la frecuencia Doppler y las calculadas a partir del tiempo de vaciado.

Figura 37

Comparativa de las velocidades calculadas y estimadas por concentración de roca



### 6.1.1 Modelos de estimación de concentración de roca a partir de la frecuencia Doppler

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 concentración de roca transportada. En este caso se presentan tres diferentes modelos de estimación. Uno polinómico teniendo en cuenta las cuatro diferentes concentraciones de las pruebas y dos modelos más, acotados para concentraciones de 0.411% a 1.356%, omitiendo las pruebas de la concentración más alta de 2.676% siendo que los resultados en las pruebas para esta concentración están más alejados del resto de las muestras.

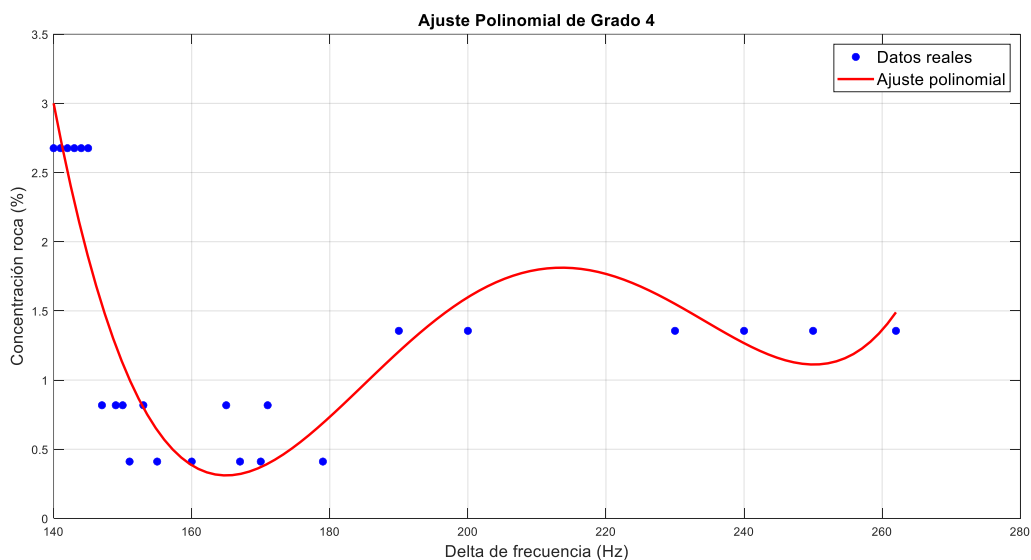
**6.1.1.1 Modelo de estimación polinómico de cuarto grado.** Se ajusta un modelo para la estimación de concentración de lodo y rocas y la ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales corresponde a un polinomio de cuarto grado, con un coeficiente de determinación  $R_2 = 0.8174$ , lo cual indica una buena correlación entre los valores observados y el modelo

propuesto (Ver figura 38). El resultado del ajuste queda expresado en la siguiente ecuación donde  $C_R$  es la concentración de roca y  $x$  la frecuencia Doppler:

$$C_R = 3.2243 \times 10^{-7} \Delta_f x^4 - 2.7029 \times 10^{-4} x^3 + 0.0838 x^2 - 11.3684 x + 570.1105 \quad (6.1)$$

### Figura 38

*Modelo polinómico de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler*



A partir de la Tabla 18 se puede determinar que el modelo de estimación de la concentración de roca 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 18**

*Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo polinómico de cuarto grado en función de la frecuencia Doppler*

Delta de frecuencia (Hz)	Concentración real %	Concentración estimada %	Error absoluto	Error relativo	Error cuadrático
160	0.411	0.385	0,0260	6.3260	0,0007
155	0.411	0.638	0,2270	55.2311	0,0515
170	0.411	0.371	0,0400	9.7323	0,0016
167	0.411	0.321	0,0900	21.8978	0,0081
151	0.411	1.003	0,5920	144.0389	0,3505
179	0.411	0.689	0,2780	67.6399	0,0773
153	0.818	0.8	0,0180	2.2004	0,0003
147	0.818	1.543	0,7250	88.6308	0,5256
165	0.818	0.311	0,5070	61.9804	0,2570
150	0.818	1.12	0,3020	36.9193	0,0912
149	0.818	1.549	0,7310	89.3643	0,5344
171	0.818	0.395	0,4230	51.7114	0,1789
250	1.356	1.112	0,2440	17.9941	0,0595
240	1.356	1.267	0,0890	6.5634	0,0079
200	1.356	1.599	0,2430	17.9203	0,0590
262	1.356	1.489	0,1330	9.8082	0,0177
230	1.356	1.551	0,1950	14.3805	0,0380
190	1.356	1.206	0,1500	11.0619	0,0225
142	2.676	2.51	0,1660	6.2032	0,0276
145	2.676	1.888	0,7880	29.4469	0,6209
140	2.676	3.001	0,3250	12.1449	0,1056
141	2.676	2.747	0,0710	2.6532	0,0050
143	2.676	2.288	0,3880	14.4992	0,1505
144	2.676	2.081	0,5950	22.2346	0,3540

La Tabla 19 presenta los resultados correspondientes a los principales indicadores estadísticos empleados para evaluar el desempeño del modelo de estimación de la concentración promedio (%). En ella se comparan los valores reales obtenidos experimentalmente con los valores estimados por el modelo, junto con las métricas de error y dispersión más representativas: Error Absoluto Medio (MAE), Error Relativo Medio (MAPE), Error Cuadrático Medio (MSE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), Desviación Estándar del Modelo y Desviación Estándar del Error Absoluto.

**Tabla 19**

*Indicadores estadísticos para el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler*

Concentración real promedio%	Concentración estimada promedio %	Error absoluto medio - MAE	Error relativo medio - MAPE	Error cuadrático medio - MSE	Raíz del error cuadrático - RMSE	Desviación estándar del modelo	Desviación estándar del error absoluto
0.411	0.565	0.2088	50.8110	0.0816	0.2857	0.2616	0.2135
0.818	0.829	0.4510	55.1345	0.2646	0.5144	0.5437	0.2710
1.356	1.515	0.1757	12.9548	0.0341	0.1847	0.2017	0.0626
2.676	2.351	0.3888	14.5304	0.2106	0.4589	0.4166	0.2671

En las concentraciones más bajas (0,411 % y 0,818 %), los valores de MAPE alcanzan niveles relativamente altos (50,81 % y 55,13 %, respectivamente), lo que sugiere que el modelo tiende a sobreestimar ligeramente la concentración real en estas condiciones. Este comportamiento puede atribuirse a la menor sensibilidad del modelo ante variaciones pequeñas en la señal o a la influencia de errores instrumentales en mediciones de baja magnitud. Por el contrario, en los niveles intermedios y altos (1,356 % y 2,676 %), el error relativo medio disminuye significativamente (12,95 % y 14,53 %), evidenciando una mejor capacidad de ajuste y mayor estabilidad del modelo en estos rangos.

La Tabla 20 compara el caudal de rocas calculado a partir de la concentración estimada por el modelo basado en delta de frecuencia Doppler con el caudal teórico calculado a partir de la concentración real. Se incluyen valores de concentración real y estimada, caudal total medido real y estimado, caudal real y estimado correspondiente a solo rocas y el porcentaje de error relativo entre ambos métodos. Esta comparación permite evaluar la precisión práctica del modelo al estimar el flujo volumétrico de rocas transportado por el lodo.

**Tabla 20**

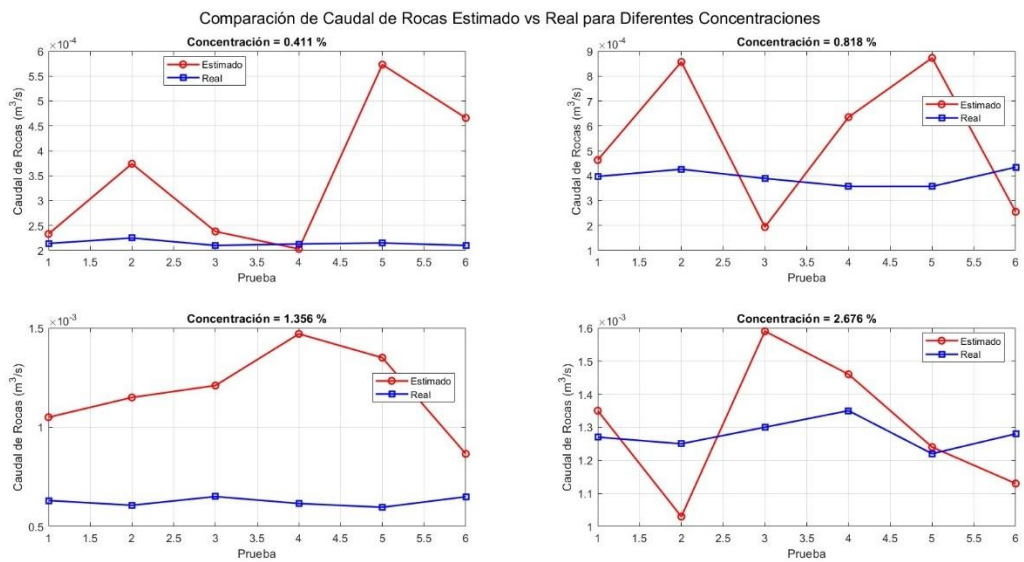
*Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler*

Concentración real %	Concentración estimada %	Caudal Total Real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Total estimado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de rocas real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal rocas estimado (m <sup>3</sup> /s)	Error absoluto %
0.411	0.385	0.0005198	0.0006049	2.136E-06	2.329E-06	9.019
0.411	0.638	0.0005485	0.0005860	2.255E-06	3.739E-06	65.827
0.411	0.371	0.0005118	0.0006427	2.103E-06	2.384E-06	13.361
0.411	0.321	0.0005184	0.0006314	2.131E-06	2.027E-06	4.880
0.411	1.003	0.0005225	0.0005709	2.147E-06	5.726E-06	166.647
0.411	0.689	0.0005110	0.0006767	2.100E-06	4.663E-06	122.014
0.818	0.800	0.0004859	0.0005784	3.975E-06	4.627E-06	16.421
0.818	1.543	0.0005211	0.0005557	4.263E-06	8.575E-06	101.170
0.818	0.311	0.0004755	0.0006238	3.890E-06	1.940E-06	50.124
0.818	1.120	0.0004361	0.0005671	3.567E-06	6.351E-06	78.041
0.818	1.549	0.0004361	0.0005633	3.567E-06	8.726E-06	144.595
0.818	0.395	0.0005308	0.0006465	4.342E-06	2.554E-06	41.186
1.356	1.112	0.0004655	0.0009451	6.313E-06	1.051E-05	66.486
1.356	1.267	0.0004480	0.0009073	6.075E-06	1.150E-05	89.226
1.356	1.599	0.0004798	0.0007561	6.507E-06	1.209E-05	85.813
1.356	1.489	0.0004541	0.0009905	6.158E-06	1.475E-05	139.504
1.356	1.551	0.0004399	0.0008695	5.966E-06	1.349E-05	126.068
1.356	1.206	0.0004796	0.0007183	6.504E-06	8.663E-06	33.201
2.676	2.510	0.0004755	0.0005368	1.272E-05	1.347E-05	5.895
2.676	1.888	0.0004655	0.0005482	1.246E-05	1.035E-05	16.924
2.676	3.001	0.0004871	0.0005293	1.303E-05	1.588E-05	21.858
2.676	2.747	0.0005033	0.0005331	1.347E-05	1.464E-05	8.730
2.676	2.288	0.0004545	0.0005406	1.216E-05	1.237E-05	1.692
2.676	2.081	0.0004776	0.0005444	1.278E-05	1.133E-05	11.349

En la Figura 39 se presenta la comparación entre los caudales de rocas estimados y los valores reales obtenidos experimentalmente para las cuatro concentraciones analizadas (0.411 %, 0.818 %, 1.356 % y 2.676 %). Cada subgráfica muestra la tendencia del modelo frente a las mediciones reales a lo largo de seis pruebas independientes, con el fin de evaluar la estabilidad y precisión del modelo propuesto.

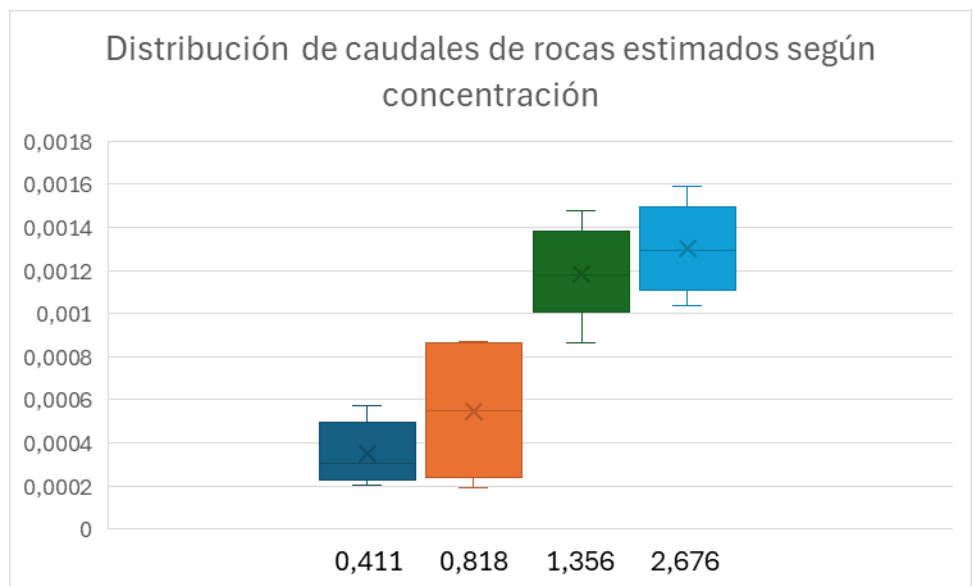
**Figura 39**

*Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo polinómico de cuarto grado a partir de la frecuencia Doppler*



**Figura**

*Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo polinómico de cuarto grado*



El diagrama de cajas y bigotes correspondiente al modelo polinómico de cuarto grado evidencia un incremento progresivo del caudal de rocas estimado a medida que aumenta la concentración de partículas en el flujo. Para la concentración más baja (0,411 %), la distribución se caracteriza por valores reducidos, con una mediana ubicada alrededor de  $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  y una variabilidad estrecha.

A una concentración de 0,818 %, la mediana aumenta notablemente hasta aproximadamente  $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , acompañada de una mayor amplitud intercuartílica, lo que indica una mayor dispersión en las estimaciones del modelo. Para concentraciones superiores (1,356 % y ,676 %), los caudales estimados se sitúan en el orden de  $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , mostrando medianas cercanas a  $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1,35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. En estos niveles, la variabilidad interna sigue siendo moderada, pero con rangos que se mantienen consistentes con el aumento de concentración.

En conjunto, el modelo polinómico de cuarto grado refleja una relación directa y coherente entre la concentración de partículas y el caudal de rocas estimado, con distribuciones que se desplazan hacia valores mayores y presentan variabilidad creciente conforme aumenta la concentración.

**6.1.1.2 Modelo de estimación logarítmico.** Dado que las mediciones correspondientes a la concentración de 2.676 % presentan una tendencia significativamente distinta respecto al resto de las pruebas, se decidió restringir el rango de análisis, omitiendo dicho conjunto de datos con el fin de evaluar el comportamiento del modelo en concentraciones bajas y medias, donde se observan las mayores variaciones del sistema.

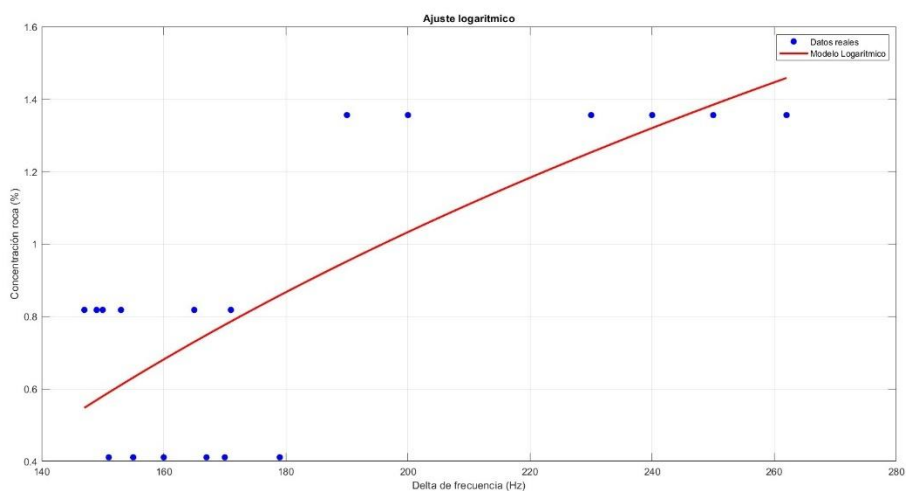
Bajo estas condiciones, y considerando la distribución de los datos experimentales, se propuso un modelo de tipo logarítmico que permite representar la relación entre la frecuencia Doppler y la concentración de rocas. Este tipo de ajuste se seleccionó debido a la tendencia creciente no lineal y asintótica observada en las mediciones, la cual se adapta adecuadamente a una función logarítmica (Figura 40).

El modelo obtenido presentó un coeficiente de determinación  $R_2 = 0.5788$ , lo cual evidencia una correlación moderada entre los valores experimentales y los estimados. La ecuación resultante del ajuste se expresa de la siguiente manera:

$$C_R = 1.576 \log(x) - 7.318 \quad (6.2)$$

### Figura 41

*Modelo logarítmico de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler*



Los resultados obtenidos del modelo logarítmico acotado se resumen en la Tabla 21 y la Tabla 22, donde se registran las concentraciones reales, las concentraciones estimadas y los errores asociados (absoluto, relativo y cuadrático) para cada una de las concentraciones analizadas.

**Tabla 21**

*Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo logarítmico en función de la frecuencia Doppler*

Delta de frecuencia (Hz)	Concentración real %	Concentración estimada %	Error absoluto	Error relativo	Error cuadrático
160	0.411	0,681	0,2702	65,7421	0,0730
155	0.411	0,631	0,2202	53,5669	0,0485
170	0.411	0,777	0,3658	88,9927	0,1338
167	0.411	0,749	0,3377	82,1655	0,1140
151	0.411	0,590	0,1790	43,5401	0,0320
179	0.411	0,858	0,4471	108,7762	0,1999
153	0.818	0,611	0,2073	25,3435	0,0430
147	0.818	0,548	0,2704	33,0526	0,0731
165	0.818	0,730	0,0883	10,7934	0,0078
150	0.818	0,579	0,2385	29,1589	0,0569
149	0.818	0,569	0,2491	30,4487	0,0620
171	0.818	0,786	0,0320	3,9108	0,0010
250	1.356	1,385	0,0286	2,1091	0,0008
240	1.356	1,320	0,0357	2,6327	0,0013
200	1.356	1,033	0,3231	23,8274	0,1044
262	1.356	1,459	0,1025	7,5590	0,0105
230	1.356	1,253	0,1028	7,5811	0,0106
190	1.356	0,952	0,4039	29,7876	0,1632

**Tabla 22**

*Indicadores estadísticos para el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler*

Concentración real promedio %	Concentración estimada promedio %	Error absoluto medio - MAE	Error relativo medio - MAPE	Error cuadrático medio - MSE	Raíz del error cuadrático - RMSE	Desviación estándar del modelo	Desviación estándar del error absoluto
0.411	0.7143	0.3033	73.7972	0.1002	0.3165	0.0992	0.0992
0.818	0.6371	0.1809	22.180	0.0406	0.2016	0.0974	0.0974
1.356	1.515	0.1661	12.2495	0.0485	0.2201	0.2004	0.1582

En términos de desempeño promedio, el modelo presentó indicó que para la concentración de 0.411 %, el error absoluto medio (MAE) fue de 0.3033, con un error relativo medio (MAPE) del 73.79 %, y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.3165. Para la concentración de 0.818 %, el MAE fue de 0.1809, el MAPE de 22.18 %, y el RMSE de 0.2016. Finalmente, para la concentración de 1.356 %, el MAE se redujo a 0.1661, el MAPE a 12.25 %, y el RMSE a 0.2201. Estos resultados evidencian una mejora progresiva en la precisión del modelo conforme aumenta

la concentración, lo que sugiere una mayor estabilidad en las mediciones en rangos superiores de concentración.

En la Tabla 23 se reportan los valores de caudal total y caudal de rocas tanto reales como estimados utilizando la concentración calculada por el modelo logarítmico. Se incluye además el error absoluto porcentual para cada medición, permitiendo una evaluación precisa de la capacidad predictiva del modelo al trasladarse a variables derivadas como el caudal de rocas.

**Tabla 23**

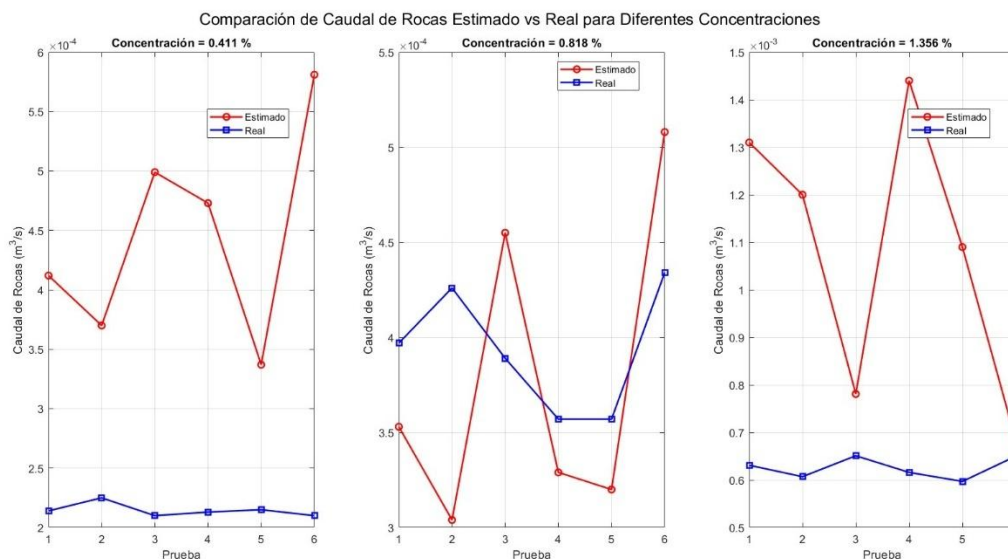
*Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler*

Concentración real %	Concentración estimada %	Caudal Total Real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Total estimado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de rocas real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal rocas estimado (m <sup>3</sup> /s)	Error absoluto %
0.411	0,681	0.0005198	0.0006049	2,14E-04	4,12E-04	92,877
0.411	0,631	0.0005485	0.0005860	2,25E-04	3,70E-04	64,066
0.411	0,777	0.0005118	0.0006427	2,10E-04	4,99E-04	137,330
0.411	0,749	0.0005184	0.0006314	2,13E-04	4,73E-04	121,874
0.411	0,590	0.0005225	0.0005709	2,15E-04	3,37E-04	56,836
0.411	0,858	0.0005110	0.0006767	2,10E-04	5,81E-04	176,475
0.818	0,611	0.0004859	0.0005784	3,97E-04	3,53E-04	11,131
0.818	0,548	0.0005211	0.0005557	4,26E-04	3,04E-04	28,607
0.818	0,730	0.0004755	0.0006238	3,89E-04	4,55E-04	17,029
0.818	0,579	0.0004361	0.0005671	3,57E-04	3,29E-04	7,879
0.818	0,569	0.0004361	0.0005633	3,57E-04	3,20E-04	10,162
0.818	0,786	0.0005308	0.0006465	4,34E-04	5,08E-04	17,034
1.356	1,385	0.0004655	0.0009451	6,31E-04	1,31E-03	107,311
1.356	1,320	0.0004480	0.0009073	6,07E-04	1,20E-03	97,190
1.356	1,033	0.0004798	0.0007561	6,51E-04	7,81E-04	20,038
1.356	1,459	0.0004541	0.0009905	6,16E-04	1,44E-03	134,612
1.356	1,253	0.0004399	0.0008695	5,97E-04	1,09E-03	82,674
1.356	0,952	0.0004796	0.0007183	6,50E-04	6,84E-04	5,158

La comparación entre caudal de rocas real y estimado se observa en la Figura 41, para cada nivel de concentración, muestran la respuesta del modelo logarítmico al aplicarse a variables derivadas de la concentración. El trazo azul representa el caudal de rocas real y el trazo rojo el estimado. Es posible visualizar claramente el grado de ajuste, las eventuales discrepancias puntuales y el comportamiento de los errores a través de las diferentes pruebas.

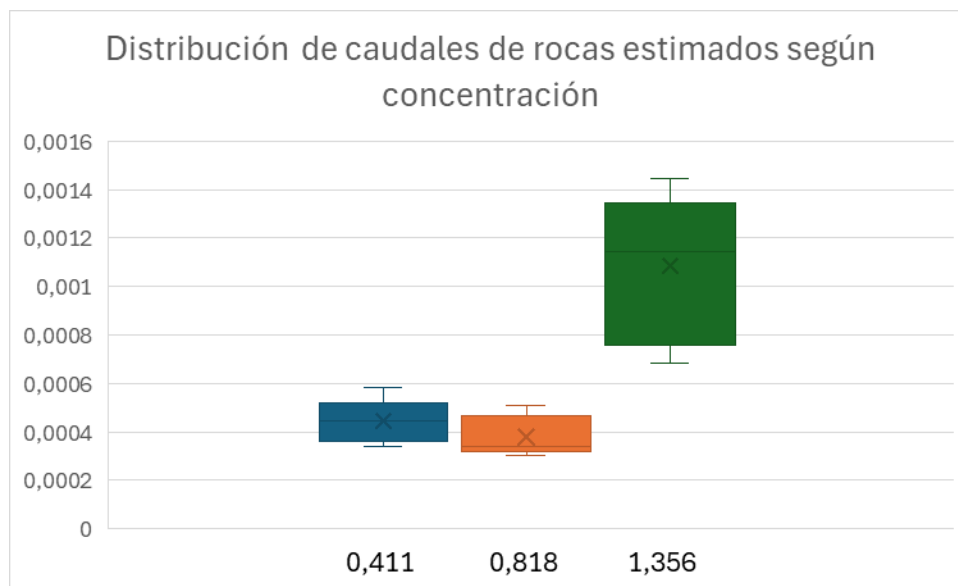
**Figura 42**

*Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo logarítmico a partir de la frecuencia Doppler*



**Figura 43**

*Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo exponencial*



El diagrama de cajas y bigotes correspondiente al modelo logarítmico acotado evidencia un incremento sostenido del caudal de rocas estimado a medida que aumenta la concentración de sólidos en el lodo. Para la concentración de 0,411 %, los valores calculados se distribuyen en un intervalo estrecho, con una mediana cercana  $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  y una dispersión reducida entre los cuartiles. Este comportamiento indica estabilidad del modelo en condiciones de baja concentración, con variabilidad mínima en las estimaciones.

En el nivel intermedio de concentración (0,818 %), el modelo mantiene un patrón de baja variabilidad, aunque la mediana presenta un ligero desplazamiento hacia valores inferiores. La similitud en la amplitud intercuartílica respecto al nivel anterior sugiere que, en este rango de concentración, el modelo tiende a generar predicciones agrupadas y con sensibilidad moderada a los cambios en el contenido de sólidos.

En contraste, para la concentración de 1,356 %, se observa un incremento significativo en el caudal estimado y un ensanchamiento notable del rango intercuartílico. La mediana se aproxima a  $1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , evidenciando un comportamiento no lineal del modelo en condiciones de mayor carga particulada. La mayor dispersión observada en este nivel sugiere que el modelo responde de manera más sensible y variable cuando la concentración supera el 1 %, coherente con el aumento esperado del transporte de partículas en suspensión.

**6.1.1.3 Modelo de estimación Gompertz.** El modelo de Gompertz se utilizó para describir la relación entre el delta de frecuencia (Hz) y la concentración (%) observada en los experimentos.

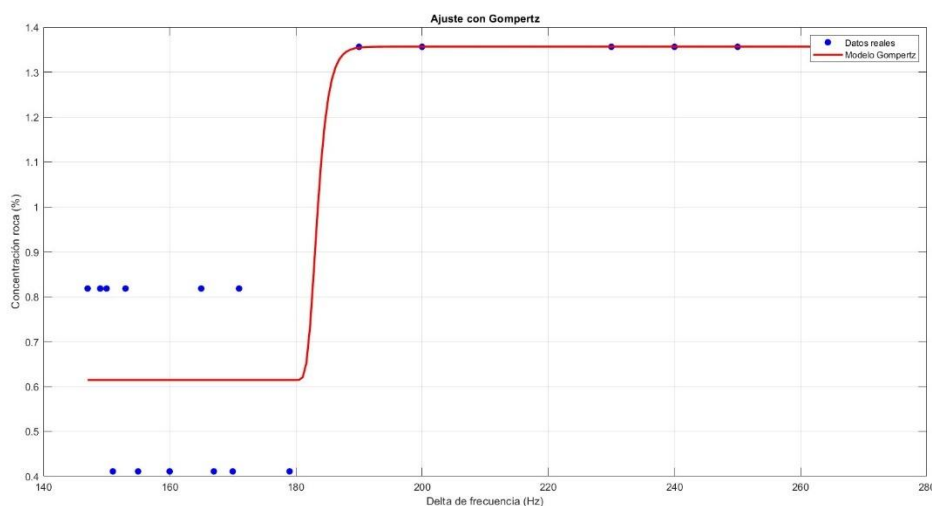
La ecuación ajustada obtenida para este conjunto de datos es:

$$C_R = 0.6145 + (1.356 - 0.6145) * \exp\left(-\exp(-0.832 * (x - 183))\right) \quad (6.3)$$

La gráfica de ajuste (Figura 42) muestra en azul los valores experimentales de concentración para cada delta de frecuencia y en rojo la curva estimada por el modelo de Gompertz. Este modelo tiene un coeficiente de determinación  $R_2 = 0.8157$  y se observa que el modelo replica adecuadamente el comportamiento tipo umbral presente en los datos, identificando claramente la transición entre niveles bajos y altos de concentración. La función de Gompertz induce una respuesta sigmoïdal, lo que permite una aproximación precisa en los extremos y una transición suave en el intervalo crítico.

### Figura 44

*Modelo Gompertz de estimación de concentración de roca en función de la frecuencia Doppler*



En la Tabla 24 se muestran los resultados tabulados para cada medición el valor real y el valor estimado de la concentración, así como diferentes métricas de error que permiten evaluar cuantitativamente el desempeño del modelo. Los errores absolutos y relativos se mantienen elevados para los niveles bajos y medios de concentración (con un error absoluto constante de 0.2035 y un error relativo de 49.51%), mientras que en los valores altos la estimación se vuelve prácticamente exacta, con errores mínimos cercanos a cero. El error cuadrático, tanto en los valores

individuales como en los indicadores globales resumidos, refuerza este patrón: la precisión del modelo en el rango alto es sustancialmente superior a la obtenida para las concentraciones por debajo del umbral sigmoidal.

**Tabla 24**

*Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo Gompertz en función de la frecuencia Doppler*

Delta de frecuencia (Hz)	Concentración real %	Concentración estimada %	Error absoluto	Error relativo	Error cuadrático
160	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
155	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
170	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
167	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
151	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
179	0.411	0,615	0,2035	49,5134	0,0414
153	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
147	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
165	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
150	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
149	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
171	0.818	0,615	0,2035	24,8778	0,0414
250	1.356	1,356	0,0004	0,0295	0,0000
240	1.356	1,356	0,0004	0,0295	0,0000
200	1.356	1,356	0,0004	0,0295	0,0000
262	1.356	1,356	0,0004	0,0295	0,0000
230	1.356	1,356	0,0004	0,0295	0,0000
190	1.356	1,354	0,0018	0,1327	0,0000

**Tabla 25**

*Indicadores estadísticos para el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler*

Concentración real promedio %	Concentración estimada promedio %	Error absoluto medio - MAE	Error relativo medio - MAPE	Error cuadrático medio - MSE	Raíz del error cuadrático - RMSE	Desviación estándar del modelo	Desviación estándar del error absoluto
0.411	0.6145	0.2035	49.5134	0.2035	0.4511	0.0000	0.0000
0.818	0.6145	0.2035	24.8778	0.2035	0.4511	0.0000	0.0000
1.356	1.3560	0.0006	0.0467	0.0008	0.0286	0.0009	0.0006

En los indicadores globales, el promedio de concentración real y estimada, junto con el MAE, MAPE, MSE, RMSE y las desviaciones estándar, permiten una visión integrada del ajuste (Tabla 25). Para la concentración alta (1.356%), el error absoluto medio es de solo 0.0006 y el

error relativo medio de 0.0467%, mientras que para los niveles bajos y medios estos indicadores se mantienen elevados y esenciales para identificar las limitaciones del modelo en esos rangos. Cabe destacar que la desviación estándar del modelo y del error absoluto son prácticamente nulas para las concentraciones altas, reflejando la estabilidad y precisión predictiva en ese intervalo.

**Tabla 26**

*Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler*

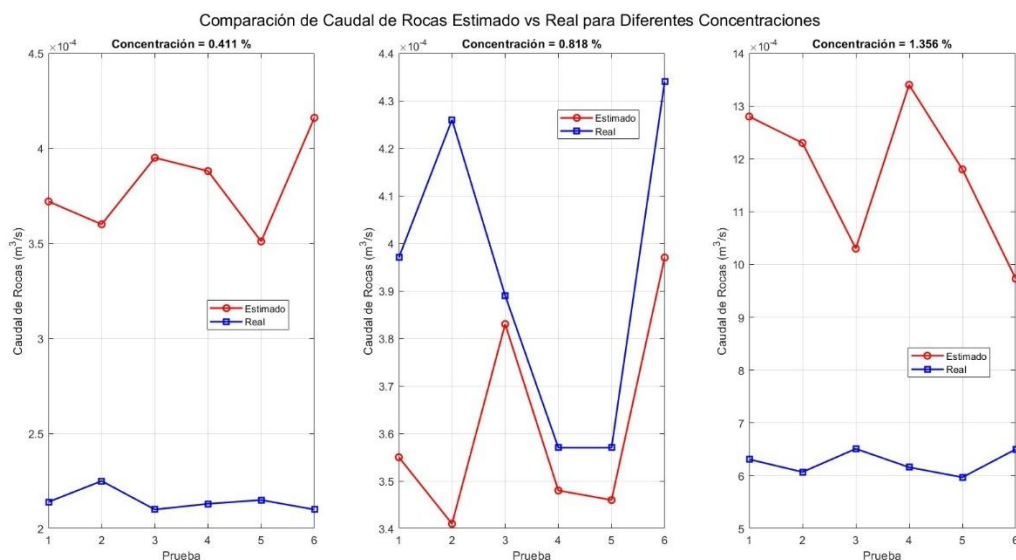
Concentración real %	Concentración estimada %	Caudal Total Real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Total estimado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de rocas real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal rocas estimado (m <sup>3</sup> /s)	Error absoluto %
0.411	0.615	0.0005198	0.0006049	2,14E-04	3,72E-04	73,991
0.411	0.615	0.0005485	0.0005860	2,25E-04	3,60E-04	59,735
0.411	0.615	0.0005118	0.0006427	2,10E-04	3,95E-04	87,754
0.411	0.615	0.0005184	0.0006314	2,13E-04	3,88E-04	82,104
0.411	0.615	0.0005225	0.0005709	2,15E-04	3,51E-04	63,363
0.411	0.615	0.0005110	0.0006767	2,10E-04	4,16E-04	97,996
0.818	0.615	0.0004859	0.0005784	3,97E-04	3,55E-04	10,577
0.818	0.615	0.0005211	0.0005557	4,26E-04	3,41E-04	19,890
0.818	0.615	0.0004755	0.0006238	3,89E-04	3,83E-04	1,448
0.818	0.615	0.0004361	0.0005671	3,57E-04	3,48E-04	2,312
0.818	0.615	0.0004361	0.0005633	3,57E-04	3,46E-04	2,966
0.818	0.615	0.0005308	0.0006465	4,34E-04	3,97E-04	8,503
1.356	1,356	0.0004655	0.0009451	6,31E-04	1,28E-03	103,089
1.356	1,356	0.0004480	0.0009073	6,07E-04	1,23E-03	102,582
1.356	1,356	0.0004798	0.0007561	6,51E-04	1,03E-03	57,633
1.356	1,356	0.0004541	0.0009905	6,16E-04	1,34E-03	118,188
1.356	1,356	0.0004399	0.0008695	5,97E-04	1,18E-03	97,717
1.356	1,354	0.0004796	0.0007183	6,50E-04	9,73E-04	49,572

La Tabla 26 de caudales correspondiente al modelo Gompertz ofrece una evaluación exhaustiva de la performance del modelo en la predicción de variables derivadas, específicamente el caudal total y el caudal de rocas, comparando resultados reales y estimados para cada grupo de concentración. Los valores de concentración real y estimada se emplean para calcular los caudales volumétricos pertinentes, presentando además el error absoluto porcentual para cada punto analizado. Se evidencia que, en concentraciones bajas, el error absoluto porcentual es elevado y oscila entre 59% y 97%, lo que indica diferencias sustanciales entre el valor real y el estimado,

vinculadas a la limitada sensibilidad del modelo en estos rangos. Para concentraciones medias, los errores porcentuales disminuyen significativamente, mostrando comportamientos más homogéneos y valores inferiores a los observados en la fase inicial. En los niveles altos de concentración, si bien la estimación de la concentración es casi idéntica al valor real, los valores de caudal estimado tienden a sobrestimar fuertemente el caudal real de rocas, resultando en errores absolutos muy altos que pueden superar el 100%, lo cual es característico del tipo de ajuste sigmoïdal y de la saturación calculada en el extremo superior del modelo.

### Figura 45

*Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo Gompertz a partir de la frecuencia Doppler*

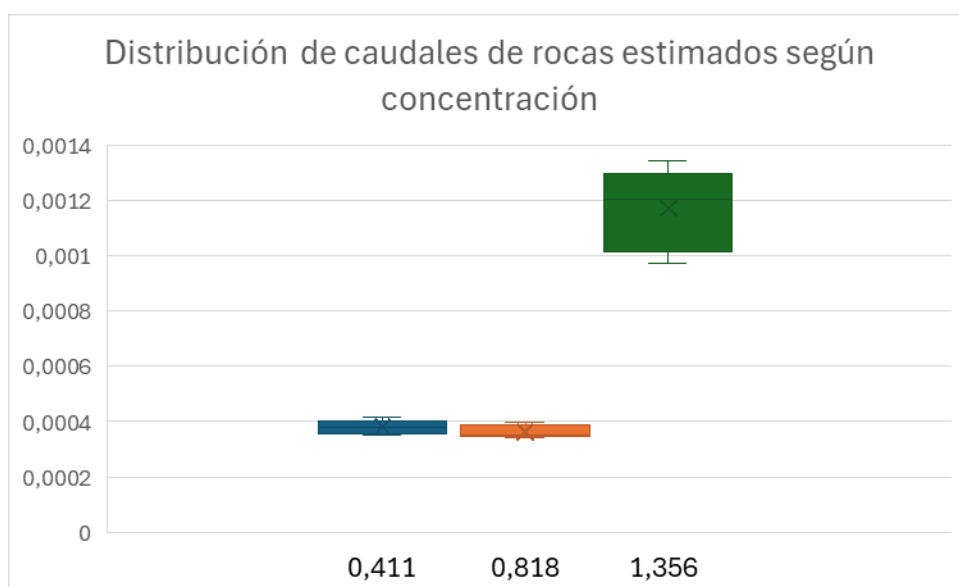


La figura 43 se pueden observar las gráficas de comparación de caudales donde muestra la evolución de los caudales de rocas reales y estimados para diversas concentraciones, permitiendo visualizar tendencias, dispersión y discrepancias a lo largo de las pruebas experimentales. En las curvas correspondientes a concentraciones bajas y medias, el modelo reproduce solo parcialmente la variabilidad real, tendiendo a sobrestimar los valores para la totalidad de las muestras. A

concentraciones altas, la discrepancia entre estimación y medición se hace más evidente, con el modelo ubicando los valores estimados consistentemente por encima de los reales. Esta visualización gráfica complementa el análisis numérico, revelando la existencia de un sesgo sistemático y corroborando la necesidad de ajustar o segmentar la función para mitigar la sobrestimación en zonas críticas.

### Figura 46

*Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de rocas estimados mediante el modelo Gompertz*



El diagrama de cajas y bigotes correspondiente al modelo de Gompertz evidencia un comportamiento creciente y progresivamente no lineal del caudal de rocas estimado a medida que aumenta la concentración de sólidos. Para la concentración de 0,411 % y 0,818 % el modelo genera valores estrechamente agrupados alrededor de una mediana cercana a  $3,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , con una amplitud intercuartílica reducida y una variabilidad mínima. Este patrón refleja estabilidad en las predicciones del modelo bajo condiciones de baja carga particulada.

Sin embargo, para la concentración más elevada (1,356 %), el comportamiento cambia de manera notable: el caudal estimado aumenta de forma pronunciada, alcanzando una mediana

cercana a  $1,15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Además, la amplitud intercuartílica se incrementa significativamente, lo que evidencia una mayor variabilidad en las predicciones. Este resultado es consistente con la zona de crecimiento acelerado de la curva de Gompertz, donde pequeñas variaciones en la concentración generan aumentos sustanciales en la magnitud del caudal de partículas.

### ***6.1.2 Modelo de estimación de concentración de rocas a partir del índice de transmisión***

Basándonos en el hecho de que, a mayor cantidad de rocas, mayor es la energía de señal captada por el sensor debido a la reflexión de la onda incidente sobre las mismas, se procede a analizar la energía en el pico más alto de la FFT de las señales. Para ello, se normaliza el eje de las señales, tanto la enviada como la recibida, ajustándolo para que su valor inicial sea cero. Luego, se mide la amplitud en el pico de cada señal. Finalmente, se calcula la relación entre la magnitud del pico de la señal recibida y la de la señal enviada (índice de transmisión), como se muestra en la Tabla 27.

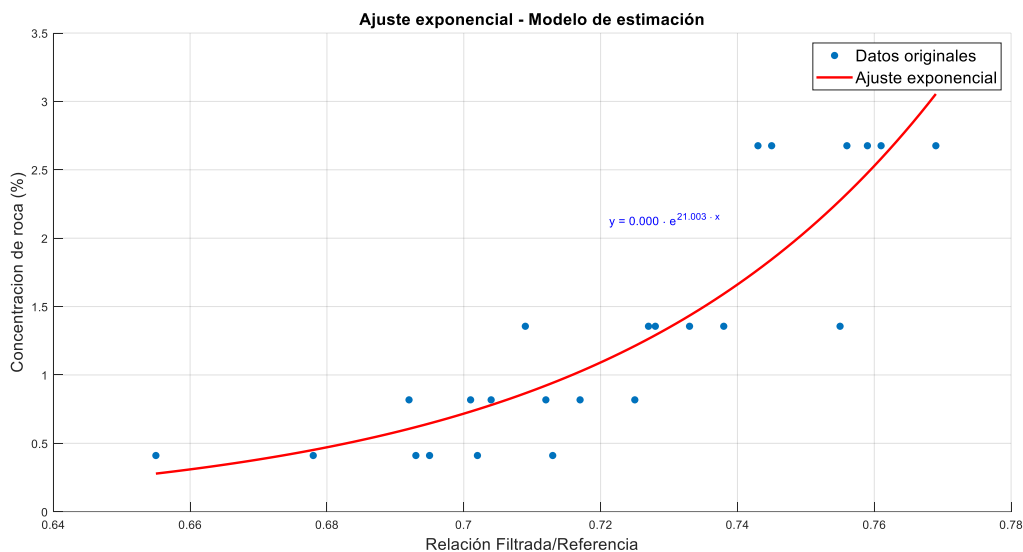
**Tabla 27***Índice de relación entre señal recibida/señal enviada*

Número de prueba	Amplitud en el pico Señal enviada (dBu)	Amplitud en el pico Señal recibida (dBu)	Índice de transmisión
1	47.48	32.19	0.678
2	47.23	32.73	0.693
3	48.57	34.09	0.702
4	47.13	30.87	0.655
5	47.50	33.01	0.695
6	48.32	34.45	0.713
1	48.31	33.86	0.701
2	47.85	34.30	0.717
3	48.35	34.03	0.704
4	47.74	33.03	0.692
5	48.04	34.83	0.725
6	48.41	34.47	0.712
1	47.45	35.02	0.738
2	47.67	34.70	0.728
3	48.01	34.90	0.727
4	47.55	35.90	0.755
5	47.77	33.87	0.709
6	48.34	35.43	0.733
1	47.98	36.89	0.769
2	47.85	36.32	0.759
3	48.28	35.97	0.745
4	48.03	36.55	0.761
5	48.23	36.46	0.756
6	48.49	36.03	0.743

**6.2.1.1 Modelo de estimación exponencial.** El cuarto modelo analizado utiliza el índice de transmisión como variable predictora para la estimación de la concentración de sólidos en la mezcla. Este índice, se evaluó para determinar su capacidad para predecir concentraciones entre el 0.411 % y el 2.676 %.

**Figura 47**

*Modelo exponencial de estimación de concentración de roca en función del índice de transmisión*



Como se muestra en la figura 44, el aumento en la cantidad de rocas presentes en el lodo genera un incremento en el valor de la relación entre la señal enviada y la señal recibida. Analizando la tendencia de los datos obtenidos en las pruebas, se ajustó un modelo exponencial que presenta un coeficiente de determinación  $R_2 = 0,7849$ , lo que indica una buena correspondencia entre los valores observados y el modelo propuesto. El resultado del ajuste se expresa mediante la siguiente ecuación, donde  $C_R$  es la concentración de roca y  $x$  el índice de transmisión:

$$C_R = 0.0000002949 \cdot e^{21.01x} \quad (6.4)$$

**Tabla 28**

*Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo exponencial en función del índice de transmisión*

Índice de transmisión	Concentración real %	Concentración estimada %	Error absoluto	Error relativo	Error cuadrático
0,678	0,411	0,452	0,0414	10,0730	0,0017
0,693	0,411	0,620	0,2087	50,7786	0,0436
0,702	0,411	0,749	0,3375	82,1168	0,1139
0,655	0,411	0,279	0,1318	32,0681	0,0174
0,695	0,411	0,646	0,2353	57,2506	0,0554
0,713	0,411	0,943	0,5318	129,3917	0,2828
0,701	0,818	0,733	0,0850	10,3912	0,0072
0,717	0,818	1,025	0,2074	25,3545	0,0430
0,704	0,818	0,779	0,0390	4,7677	0,0015
0,692	0,818	0,607	0,2112	25,8191	0,0446
0,725	0,818	1,212	0,3940	48,1663	0,1552
0,712	0,818	0,922	0,1040	12,7139	0,0108
0,738	1,356	1,593	0,2367	17,4558	0,0560
0,728	1,356	1,291	0,0650	4,7935	0,0042
0,727	1,356	1,264	0,0920	6,7847	0,0085
0,755	1,356	2,276	0,9200	67,8466	0,8464
0,709	1,356	0,866	0,4900	36,1357	0,2401
0,733	1,356	1,434	0,0780	5,7522	0,0061
0,769	2,676	3,054	0,3780	14,1256	0,1429
0,759	2,676	2,476	0,2000	7,4738	0,0400
0,745	2,676	1,845	0,8310	31,0538	0,6906
0,761	2,676	2,582	0,0940	3,5127	0,0088
0,756	2,676	2,324	0,3520	13,1540	0,1239
0,743	2,676	1,769	0,9070	33,8939	0,8226

**Tabla 29**

*Indicadores estadísticos para el modelo exponencial a partir del índice de transmisión*

Concentración real promedio %	Concentración estimada promedio %	Error absoluto medio - MAE	Error relativo medio - MAPE	Error cuadrático medio - MSE	Raíz del error cuadrático - RMSE	Desviación estándar del modelo	Desviación estándar del error absoluto
0,411	0,615	0,2478	60,2798	0,0858	0,2929	0,2304	0,2478
0,818	0,880	0,1734	21,2021	0,0437	0,2091	0,2189	0,1734
1,356	1,454	0,3136	23,1281	0,1935	0,4399	0,4698	0,3136
2,676	2,342	0,4603	17,2023	0,3048	0,5521	0,4813	0,4603

Los indicadores estadísticos evidencian que el desempeño del modelo basado en el índice de transmisión depende del nivel de concentración se representan en la Tabla 29. En las concentraciones más bajas (0,411 % y 0,818 %), se observa una marcada diferencia en precisión:

mientras el nivel de 0,411 % presenta un MAE elevado y un MAPE cercano al 60 %, indicando poca capacidad de estimación, el nivel de 0,818 % reduce ambos errores de manera significativa, mostrando un comportamiento más estable y una menor dispersión según el RMSE y la desviación estándar del modelo.

En las concentraciones intermedias y altas (1,356 % y 2,676 %), la magnitud del error absoluto aumenta, reflejando una mayor distancia entre los valores reales y los estimados. Aunque el MAPE disminuye en los niveles más altos debido al mayor valor base, el RMSE y el MSE se incrementan considerablemente, lo que indica una mayor variabilidad e inconsistencias en la predicción. En conjunto, los resultados muestran que el modelo presenta un rendimiento moderado, con precisión dependiente del rango de concentración y mayor estabilidad en niveles intermedios.

Esta Tabla 30 presenta una comparación similar, donde el caudal estimado de rocas se obtiene a partir de la concentración derivada del índice de transmisión de las señales acústicas y se contrastan los valores con el caudal real de rocas, analizando el error de estimación en términos relativos y absolutos.

**Tabla 30**

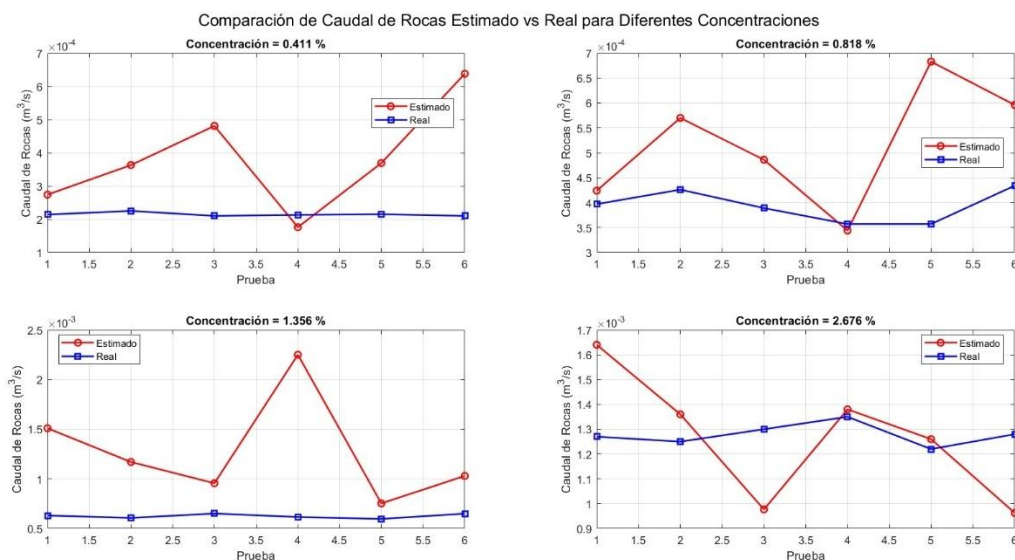
*Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo exponencial a partir del índice de transmisión*

Concentración real %	Concentración estimada %	Caudal Total Real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Total estimado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de rocas real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal rocas estimado (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo %
0.411	0,452	0.0005198	0.0006049	2,14E-04	2,74E-04	28,094
0.411	0,620	0.0005485	0.0005860	2,25E-04	3,63E-04	61,087
0.411	0,749	0.0005118	0.0006427	2,10E-04	4,81E-04	128,696
0.411	0,279	0.0005184	0.0006314	2,13E-04	1,76E-04	17,260
0.411	0,646	0.0005225	0.0005709	2,15E-04	3,69E-04	71,817
0.411	0,943	0.0005110	0.0006767	2,10E-04	6,38E-04	203,776
0.818	0,733	0.0004859	0.0005784	3,97E-04	4,24E-04	6,667
0.818	1,025	0.0005211	0.0005557	4,26E-04	5,70E-04	33,678
0.818	0,779	0.0004755	0.0006238	3,89E-04	4,86E-04	24,934
0.818	0,607	0.0004361	0.0005671	3,57E-04	3,44E-04	3,536
0.818	1,212	0.0004361	0.0005633	3,57E-04	6,83E-04	91,383
0.818	0,922	0.0005308	0.0006465	4,34E-04	5,96E-04	37,283
1.356	1,593	0.0004655	0.0009451	6,31E-04	1,51E-03	138,469
1.356	1,291	0.0004480	0.0009073	6,07E-04	1,17E-03	92,814
1.356	1,264	0.0004798	0.0007561	6,51E-04	9,56E-04	46,895
1.356	2,276	0.0004541	0.0009905	6,16E-04	2,25E-03	266,113
1.356	0,866	0.0004399	0.0008695	5,97E-04	7,53E-04	26,233
1.356	1,434	0.0004796	0.0007183	6,50E-04	1,03E-03	58,386
2.676	3,054	0.0004755	0.0005368	1,27E-03	1,64E-03	28,838
2.676	2,476	0.0004655	0.0005482	1,25E-03	1,36E-03	8,944
2.676	1,845	0.0004871	0.0005293	1,30E-03	9,77E-04	25,081
2.676	2,582	0.0005033	0.0005331	1,35E-03	1,38E-03	2,200
2.676	2,324	0.0004545	0.0005406	1,22E-03	1,26E-03	3,317
2.676	1,769	0.0004776	0.0005444	1,28E-03	9,63E-04	24,648

Los análisis realizados muestran que los errores absolutos y relativos son más elevados en concentraciones bajas. Por ejemplo, para las concentraciones de 1.356%, el error relativo con las concentraciones estimadas supera el 50%, lo que sugiere que el modelo tiene mayor precisión en concentraciones más altas. En cuanto al promedio de la concentración de rocas modeladas, los valores son consistentes en ciertos rangos, aunque presentan desviaciones significativas en algunos casos.

## Figura 48

Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo exponencial a partir del índice de transmisión

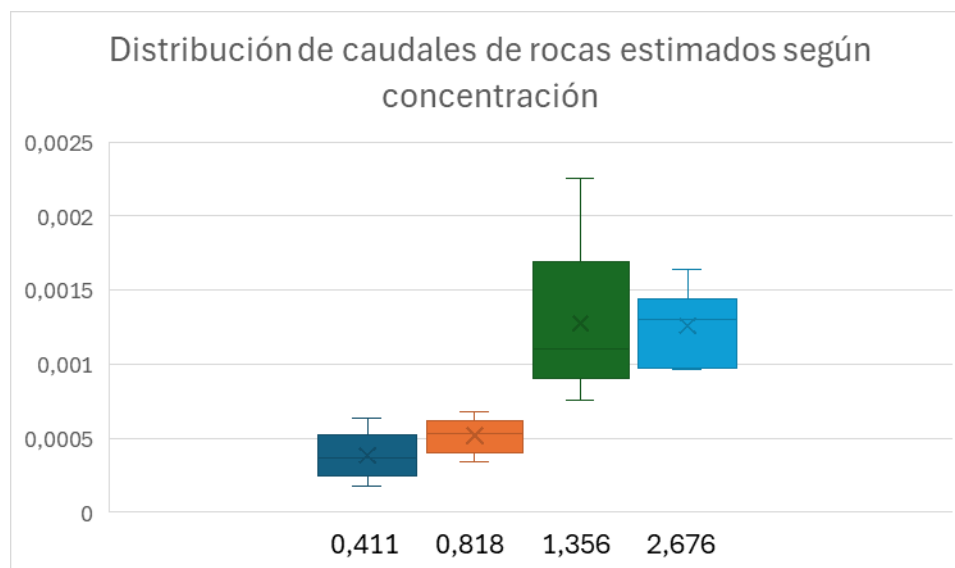


La gráfica de comparación de caudales correspondiente al cuarto modelo permite visualizar de manera detallada el desempeño del ajuste en la estimación del caudal de rocas para diferentes niveles de concentración (Figura 45). En cada uno de los paneles, se muestran en líneas diferenciadas los valores de caudal real medido y los estimados por el modelo para cada prueba experimental, proporcionando una visión directa sobre la precisión y el sesgo del ajuste.

Los resultados evidencian que el modelo tiende a sobrestimar sistemáticamente el caudal de rocas para todos los grupos de concentración, con las diferencias más marcadas en las concentraciones más altas. Esta tendencia se mantiene constante a través de las pruebas, donde la línea correspondiente al valor estimado se ubica consistentemente por encima de la línea del valor real, reflejando una baja coincidencia en el patrón de variabilidad y una pérdida de sensibilidad en la captura de fluctuaciones puntuales entre pruebas.

**Figura 49**

*Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de rocas estimados mediante el modelo exponencial*



El diagrama de cajas y bigotes correspondiente al modelo exponencial evidencia un incremento marcado y progresivo del caudal de rocas estimado conforme aumenta la concentración de sólidos, reflejando la naturaleza multiplicativa propia de este tipo de modelo.

Para la concentración de 0,411 %, las estimaciones presentan una mediana cercana a  $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , acompañada de una dispersión moderada. La amplitud intercuartílica relativamente estrecha indica un comportamiento estable y una variabilidad controlada en condiciones de baja concentración. A medida que la concentración se incrementa a 0,818 %, el modelo predice un aumento suave del caudal, con una mediana próxima a  $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . El rango intercuartílico conserva una magnitud similar a la del nivel anterior, lo que demuestra que el modelo responde de forma proporcional y sin variaciones abruptas en esta fase inicial del crecimiento exponencial.

En la concentración de 1,356 %, las estimaciones muestran un cambio sustancial: la mediana asciende hasta aproximadamente  $1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , y la dispersión aumenta de manera significativa. El ensanchamiento del intervalo intercuartílico demuestra la variabilidad ante incrementos moderados en la concentración.

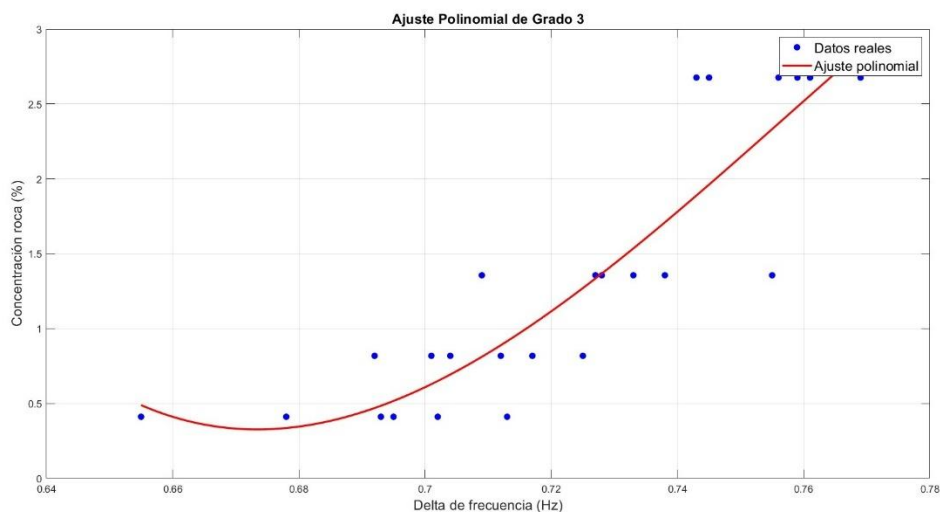
Finalmente, para la concentración más elevada evaluada (2,676 %), el modelo predice un caudal considerablemente mayor, con una mediana cercana a  $1,35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Aunque la dispersión disminuye respecto al nivel anterior, se mantiene un rango amplio, lo que sugiere que el modelo continúa reflejando la sensibilidad de la estimación ante altas cargas de material particulado.

**6.2.1.2 Modelo de estimación polinómico de tercer grado.** La gráfica obtenida para el cuarto modelo, que utiliza una aproximación polinomial de tercer grado en función del índice de transmisión, presenta una curva ajustada que logra capturar la tendencia ascendente de la concentración de roca conforme aumenta el delta de frecuencia (Figura 46). La Ecuación X del modelo, permite describir de forma flexible la variabilidad observable en los datos experimentales, con un coeficiente de terminación de que presenta un coeficiente de determinación de  $R_2 = 0,8012$ . Los puntos azules representan las mediciones reales, mientras que la curva roja ilustra la respuesta pronosticada por el ajuste polinomial, mostrando una concordancia aceptable y una capacidad para adaptar la forma de la función a diferentes rangos del índice de transmisión.

$$C_R = -1.7749 \times 10^3 x^3 + 4.031 \times 10^3 x^2 - 3.0154 \times 10^3 x + 744.6105 \quad (6.4)$$

### Figura 50

*Modelo polinómico de tercer grado de estimación de concentración de roca en función del índice de transmisión*



La Tabla 31 se observan los datos experimentales y estimados por el modelo incluye los valores del índice de transmisión, junto con los errores absoluto y relativo y el error cuadrático para cada observación. Es evidente que el modelo reproduce con mayor precisión los valores de concentración intermedios, minimizando los errores absolutos y relativos en estos puntos. Sin embargo, existen algunas discrepancias aisladas en los extremos de la serie, especialmente en los valores bajos y altos de concentración, donde el error relativo puede incrementarse.

**Tabla 31**

*Comparativa entre la concentración real y estimada del modelo polinómico de tercer grado en función del índice de transmisión*

Índice de transmisión	Concentración real %	Concentración estimada %	Error absoluto	Error relativo	Error cuadrático
0,678	0.411	0,33566	0,0753	18,3309	0,0057
0,693	0.411	0,48431	0,0733	17,8370	0,0054
0,702	0.411	0,64962	0,2386	58,0584	0,0569
0,655	0.411	0,48863	0,0776	18,8881	0,0060
0,695	0.411	0,51654	0,1055	25,6788	0,0111
0,713	0.411	0,91553	0,5045	122,7567	0,2546
0,701	0.818	0,62876	0,1892	23,1345	0,0358
0,717	0.818	1,0271	0,2091	25,5623	0,0437
0,704	0.818	0,6931	0,1249	15,2689	0,0156
0,692	0.818	0,46922	0,3488	42,6381	0,1216
0,725	0.818	1,2701	0,4521	55,2689	0,2044
0,712	0.818	0,88879	0,0708	8,6540	0,0050
0,738	1.356	1,7092	0,3532	26,0472	0,1248
0,728	1.356	1,3671	0,0111	0,8186	0,0001
0,727	1.356	1,3344	0,0216	1,5929	0,0005
0,755	1.356	2,332	0,9760	71,9764	0,9526
0,709	1.356	0,81151	0,5445	40,1541	0,2965
0,733	1.356	1,535	0,1790	13,2006	0,0320
0,769	2.676	2,8523	0,1763	6,5882	0,0311
0,759	2.676	2,4815	0,1945	7,2683	0,0378
0,745	2.676	1,9615	0,7145	26,7003	0,5105
0,761	2.676	2,5561	0,1199	4,4806	0,0144
0,756	2.676	2,3694	0,3066	11,4574	0,0940
0,743	2.676	1,8886	0,7874	29,4245	0,6200

La Tabla 32 resume de indicadores estadísticos globales resume el comportamiento del modelo para los diferentes subgrupos de concentración. El error absoluto medio (MAE) varía de 0.1792 a 0.3832, reflejando una precisión razonable en la mayoría de los casos, mientras que el error relativo medio (MAPE) oscila entre 43.59% y 14.32%, mostrando una mejor capacidad de ajuste en concentraciones más elevadas. Los valores de error cuadrático medio (MSE) y raíz del error cuadrático (RMSE) también confirman esta tendencia, siendo menores en los niveles altos, lo que sugiere una mayor fiabilidad del modelo en esos rangos. Las desviaciones estándar, tanto del modelo como del error absoluto, son moderadas y muestran cierta dispersión alrededor de los

promedios, indicando la existencia de variabilidad en la predicción, pero sin una dispersión extrema.

**Tabla 32**

*Indicadores estadísticos para el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión*

Concentración real promedio %	Concentración estimada promedio %	Error absoluto medio - MAE	Error relativo medio - MAPE	Error cuadrático medio - MSE	Raíz del error cuadrático - RMSE	Desviación estándar del modelo	Desviación estándar del error absoluto
0.411	0.565	0.1792	43.5916	0.2379	0.4878	0.1987	0.1715
0.818	0.829	0.2325	28.4211	0.2665	0.5163	0.2917	0.1428
1.356	1.515	0.3476	25.6316	0.4842	0.6958	0.5010	0.3692
2.676	2.351	0.3832	14.3199	0.4669	0.6833	0.3678	0.2921

La Tabla 33 de caudales calculados ofrece una comparación entre los valores reales y estimados de concentración, caudal total y caudal de rocas para cada muestra, permitiendo así evaluar directamente el desempeño del modelo polinomial en la predicción de variables derivadas relevantes para el proceso. Los datos muestran que, en la mayoría de los casos, la magnitud del caudal total estimado se aproxima al valor real, aunque persisten desviaciones apreciables, sobre todo en las estimaciones del caudal de rocas.

**Tabla 33**

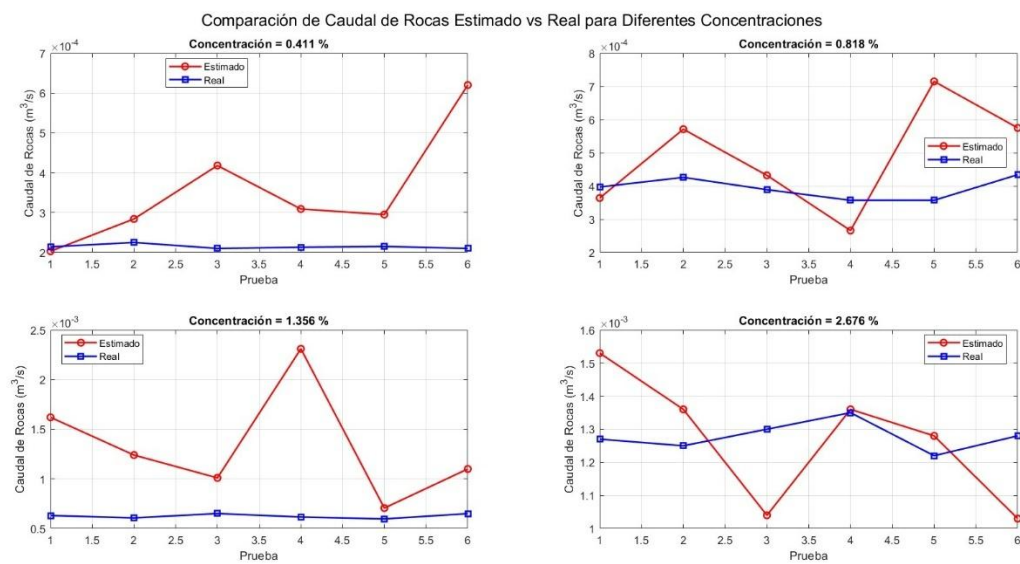
*Comparativa del caudal teórico y el estimado mediante el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión*

Concentración real %	Concentración estimada %	Caudal Total Real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Total estimado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de rocas real (m <sup>3</sup> /s)	Caudal rocas estimado (m <sup>3</sup> /s)	Error absoluto %
0.411	0,336	0.0005198	0.0006049	2,14E-04	2,03E-04	4,960
0.411	0,484	0.0005485	0.0005860	2,25E-04	2,84E-04	25,893
0.411	0,650	0.0005118	0.0006427	2,10E-04	4,18E-04	98,484
0.411	0,489	0.0005184	0.0006314	2,13E-04	3,09E-04	44,803
0.411	0,517	0.0005225	0.0005709	2,15E-04	2,95E-04	37,321
0.411	0,916	0.0005110	0.0006767	2,10E-04	6,20E-04	194,989
0.818	0,629	0.0004859	0.0005784	3,97E-04	3,64E-04	8,502
0.818	1,027	0.0005211	0.0005557	4,26E-04	5,71E-04	33,899
0.818	0,693	0.0004755	0.0006238	3,89E-04	4,32E-04	11,157
0.818	0,469	0.0004361	0.0005671	3,57E-04	2,66E-04	25,407
0.818	1,270	0.0004361	0.0005633	3,57E-04	7,15E-04	100,557
0.818	0,889	0.0005308	0.0006465	4,34E-04	5,75E-04	32,338

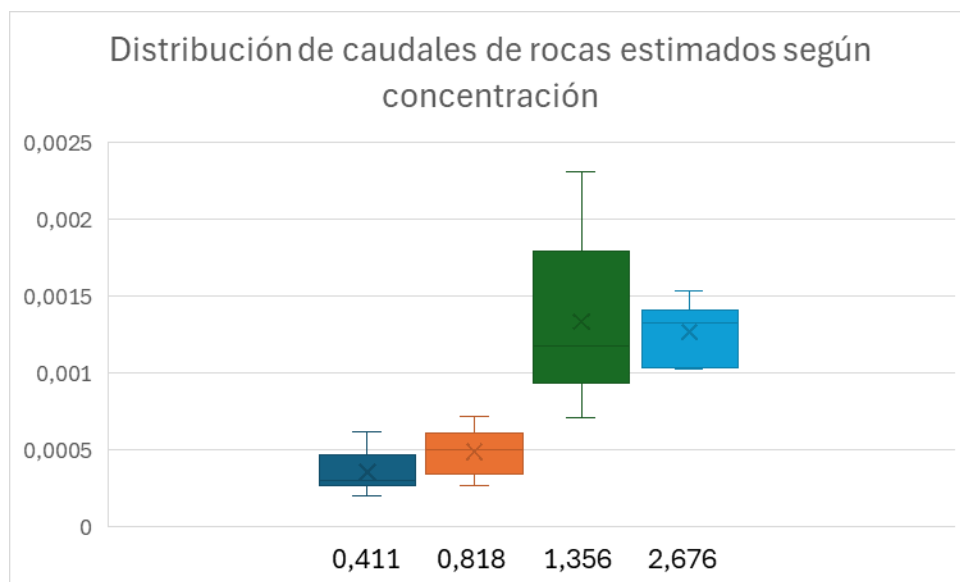
1.356	1,709	0.0004655	0.0009451	6,31E-04	1,62E-03	155,912
1.356	1,367	0.0004480	0.0009073	6,07E-04	1,24E-03	104,180
1.356	1,334	0.0004798	0.0007561	6,51E-04	1,01E-03	55,076
1.356	2,332	0.0004541	0.0009905	6,16E-04	2,31E-03	275,121
1.356	0,812	0.0004399	0.0008695	5,97E-04	7,06E-04	18,290
1.356	1,535	0.0004796	0.0007183	6,50E-04	1,10E-03	69,541
2.676	2,852	0.0004755	0.0005368	1,27E-03	1,53E-03	20,329
2.676	2,482	0.0004655	0.0005482	1,25E-03	1,36E-03	9,186
2.676	1,962	0.0004871	0.0005293	1,30E-03	1,04E-03	20,350
2.676	2,556	0.0005033	0.0005331	1,35E-03	1,36E-03	1,175
2.676	2,369	0.0004545	0.0005406	1,22E-03	1,28E-03	5,335
2.676	1,889	0.0004776	0.0005444	1,28E-03	1,03E-03	19,553

Las gráficas de caudales comparativos ilustran en cuatro paneles la evolución de los caudales de rocas reales y estimados para cada concentración (Figura 47). En todas las series, la línea correspondiente al caudal estimado muestra una tendencia a ubicarse por encima de la línea de caudal real, evidenciando la existencia de un sesgo sistemático de sobrestimación en el modelo. La variabilidad experimental entre pruebas y la divergencia entre ambas curvas se acentúan con el aumento de la concentración, lo cual es indicativo del comportamiento no lineal y la eventual limitación de ajuste en los extremos del rango de análisis. Esta visualización permite identificar patrones de consistencia en el modelo, pero también áreas donde la precisión se ve comprometida y sería necesario validar con métodos alternativos o introducir correcciones adicionales para mejorar el ajuste.

**Figura 51** Gráficas comparativas entre el caudal real y estimado mediante el modelo polinómico de tercer grado a partir del índice de transmisión



**Figura 52** Diagrama de cajas y bigotes para los caudales de roca estimados mediante el modelo polinómico de tercer grado



El diagrama de cajas y bigotes correspondiente al modelo polinómico de tercer grado revela una tendencia creciente del caudal de rocas estimado conforme aumenta la concentración de sólidos en el fluido. Este comportamiento indica que el modelo captura adecuadamente la relación no lineal entre ambas variables, aunque con distintos niveles de dispersión según el rango de concentración.

Para la concentración de 0,411 % y 0,818 %, las estimaciones presentan una mediana aproximadamente igual a  $3,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , con una dispersión moderada reflejada en un intervalo intercuartílico relativamente estrecho. Esto sugiere que, en condiciones de baja concentración, el modelo predice caudales estables y con variabilidad limitada.

En la concentración de 1,356 %, el modelo predice un aumento significativo en el caudal de rocas, con una mediana del orden de  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . El intervalo intercuartílico se ensancha de forma considerable, acompañado de valores máximos notablemente superiores, lo cual evidencia que el modelo introduce una mayor dispersión a medida que el comportamiento del sistema se vuelve más complejo y no lineal en concentraciones elevadas.

Finalmente, para la concentración de 2,676 %, la mediana del caudal se sitúa alrededor de  $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . A diferencia del nivel anterior, la dispersión disminuye y el rango intercuartílico se vuelve más estrecho, mostrando que el modelo tiende a estabilizar sus predicciones en concentraciones muy altas, reduciendo la variabilidad y proporcionando valores más consistentes dentro de este dominio.

## 7. Conclusiones

El estudio demostró que es técnicamente viable estimar el flujo volumétrico de cortes y derrumbes (rocas) 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  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ . 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 cortes y derrumbes. 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 concentraciones de 1.356%, se evidencia una mejora en la precisión del modelo polinómico de cuarto grado, con errores relativos que oscilan entre el 2.20 % y el 89.36 %. 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 1.356 %, el modelo muestra un desempeño más preciso, con errores absolutos bajos, correspondientes a errores relativos de 6.56%, 9.80% y 11.06%. Esto evidencia una alta capacidad de dicho 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 del 29.44%, lo que indica una ligera disminución en la precisión del modelo para valores extremos.

El modelo presenta un coeficiente de determinación  $R_2 = 0.8174$ , lo que sugiere que explica el 86 % de la variabilidad en las concentraciones de roca 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 concentraciones medias y altas, mientras que en las masas bajas se presentan mayores errores y variabilidad en las estimaciones.

Para el modelo logarítmico acotado permite obtener una estimación más confiable de la concentración en comparación con el modelo general, especialmente al eliminar los datos atípicos asociados a la concentración de 2.676 %. Aunque el coeficiente de determinación ( $R_2 = 0.5788$ ) aún refleja un ajuste moderado, los indicadores de error muestran una mejora sustancial, validando la pertinencia del modelo para representar la relación entre la variación de frecuencia y la concentración en el rango analizado.

En el modelo logarítmico los indicadores estadísticos muestran que los errores relativos y absolutos disminuyen para concentraciones mayores, lo que sugiere que el modelo es más preciso en ese rango, mientras que para las concentraciones más bajas se observan errores relativos significativamente mayores. El error cuadrático medio y la desviación estándar del error absoluto

avalan la calidad del ajuste, aunque la dispersión de los errores indica la presencia de cierta variabilidad no explicada por el modelo, especialmente en bajas concentraciones.

Para el modelo Gompertz, la predicción de caudales a partir de la estimación de las concentraciones demuestra una eficacia aceptable en la identificación de la dinámica general del sistema, especialmente en rangos de transición y saturación. Teniendo un  $R_2 = 0.8157$  Sin embargo, la sobrestimación observada tanto en los valores de concentración baja como alta, y la consecuente afectación al cálculo de caudales, resalta la importancia de validar el modelo en intervalos específicos y considerar la incorporación de mecanismos de corrección o modelos complementarios. Aunque el modelo logra describir el comportamiento global y las transiciones de régimen, su aplicación directa en la estimación puntual de caudal puede conducir a desviaciones relevantes respecto a valores experimentales.

El modelo exponencial propuesto es una herramienta útil para estimar la concentración de rocas en función de la relación del índice de transmisión, especialmente en concentraciones medias y altas, donde los errores son relativamente bajos (<10 %). Sin embargo, en concentraciones bajas, el modelo presenta mayores desviaciones y errores, lo que podría requerir ajustes adicionales o la inclusión de un término correctivo para mejorar su precisión.

En general, el coeficiente de determinación  $R_2 = 0,7849$  respalda la validez del modelo exponencial, indicando que es capaz de explicar la mayor parte de la variabilidad en los datos. Para mejorar la estimación en concentraciones bajas, sería conveniente analizar factores adicionales que puedan influir en la relación señal enviada/señal recibida, como el tamaño de las rocas o las propiedades del lodo.

En el modelo exponencial la comparación entre los caudales reales y los caudales estimados a partir del modelo basado en el índice de transmisión evidencia un comportamiento

heterogéneo en la capacidad predictiva del método. Para las concentraciones más bajas (0,411 %), el modelo presenta una sobreestimación sistemática tanto en el caudal total como en el caudal asociado al flujo de rocas. Esta tendencia se refleja en errores absolutos elevados, que en varios casos superan el 100 %, lo que indica una sensibilidad significativa del modelo ante pequeñas variaciones de señal en este rango. Aunque algunos valores puntuales muestran menores desviaciones, el patrón general confirma que la estimación en bajas concentraciones es inestable y altamente dispersa. Sin embargo, persisten episodios de sobreestimación moderada y elevada, lo que evidencia que el modelo aún presenta vulnerabilidad ante variaciones en la señal óptica. Para la concentración intermedia de 1,356 %, el comportamiento vuelve a deteriorarse: los caudales estimados superan ampliamente los valores reales, con errores que alcanzan o superan el 200 % en algunos ensayos, reflejando una marcada sobre respuesta del modelo en condiciones de mayor densidad de partículas.

Para el modelo polinomial de tercer grado, considerando el coeficiente de determinación  $R_2 = 0,8012$ , permiten afirmar que el ajuste propuesto explica una proporción significativa de la variabilidad observada en los datos experimentales de concentración. Este valor de  $R_2$  indica que el modelo logra captar el 80.12% de la variabilidad total de la concentración en función del índice de transmisión, lo que evidencia una adecuada capacidad de adaptación y validez para describir el fenómeno bajo estudio.

La concordancia entre la curva ajustada y los datos reales en el modelo polinómico de tercer grado es apreciable tanto en la gráfica como en los valores individuales y las métricas de error reportadas, respalda la utilidad de la aproximación polinomial para la predicción dentro del rango analizado. Los valores de error absoluto medio y de error relativo medio muestran una precisión razonable, especialmente en concentraciones intermedias y altas, aunque en los extremos

continúan presentándose discrepancias puntuales que deben ser tenidas en cuenta para interpretaciones aplicadas. Así mismo, la tabla de indicadores estadísticos globales resume el comportamiento del modelo para los diferentes subgrupos de concentración. El error absoluto medio (MAE) varía de 0.1792 a 0.3832, reflejando una precisión razonable en la mayoría de los casos, mientras que el error relativo medio (MAPE) oscila entre 43.59% y 14.32%, mostrando una mejor capacidad de ajuste en concentraciones más elevadas. Los valores de error cuadrático medio (MSE) y raíz del error cuadrático (RMSE) también confirman esta tendencia, siendo menores en los niveles altos, lo que sugiere una mayor fiabilidad del modelo en esos rangos.

Al comparar las estimaciones de la velocidad del lodo con las calculadas a partir del 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.

## 8. Recomendaciones

Se recomienda ajustar los modelos matemáticos para reducir los errores relativos elevados observados en condiciones de bajas concentraciones y masas, considerando la inclusión de parámetros correctivos y la implementación de técnicas avanzadas de filtrado de ruido, con el fin de obtener una señal Doppler y un índice de transmisión más robustos.

Asimismo, es importante continuar con la validación experimental del modelo en escenarios más cercanos a condiciones reales de perforación. Los ensayos de laboratorio realizados han permitido comprobar la viabilidad de la técnica Doppler con arreglos piezoeléctricos en tuberías de acero-carbono; sin embargo, se requiere ampliar las pruebas empleando diferentes composiciones de lodo, mayores presiones, y variaciones en el tamaño y concentración de los cortes y derrumbes. Este tipo de estudios permitirá establecer con mayor precisión los límites de sensibilidad y exactitud de la técnica propuesta.

También se sugiere realizar pruebas con distintos tipos de piezo-actuadores que presenten menores limitaciones eléctricas al momento de implementar el experimento, buscando un mayor ancho de banda, capacidad de amplificación y resistencia eléctrica. Adicionalmente, se recomienda ampliar el rango de tipos de lodo y partículas considerados en los ensayos, incorporando cortes y derrumbes de diferentes tamaños y composiciones, con el propósito de evaluar el desempeño del modelo en condiciones más diversas y representativas.

En el presente trabajo se empleó una única frecuencia, seleccionada previamente por ser la más adecuada para la transmisión en las condiciones de prueba. Sin embargo, la longitud de onda asociada a dicha frecuencia restringió la utilización de rocas con diámetros superiores a 2 cm, limitando así el rango de tamaños detectables. Por ello, se recomienda realizar ensayos adicionales

utilizando un espectro más amplio de frecuencias, con el fin de correlacionar cada longitud de onda con diferentes tamaños de roca y, de esta manera, mejorar la capacidad de identificación del material sólido presente en el lodo.

Finalmente, se plantea avanzar hacia el diseño de un prototipo portátil con potencial de escalamiento industrial, que integre sistemas de comunicación en tiempo real mediante tecnologías IoT. Este tipo de desarrollo facilitaría la incorporación del sistema en operaciones de campo, permitiendo la monitorización continua de la estabilidad de los pozos y la reducción de riesgos asociados a derrumbes y cortes o colapsos. Asimismo, explorar aplicaciones en otros sectores — como la hidrodinámica, la industria energética o la bioingeniería— representa una oportunidad para transferir el conocimiento adquirido y diversificar el impacto de la tecnología desarrollada.

### Referencias Bibliográficas

1. Carvajal-Jiménez JM. Estimation of Caving volumetric-flow using the ultrasonic Doppler method. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro. 2018 Jun 14.
2. Olsvik K, Kjørnes I, et al. Disruptive Clamp-On Technology Tested for Mud Measurement. Presented at: Day 1 Tue; 2019 May 14.
3. Zhou Q, Zhang H, et al. Research on Mud Flow Rate Measurement Method Based on Continuous Doppler Ultrasonic Wave. Int J Optics. 2017 Jul 19.
4. Zharnikov T, Katterbauer K, et al. Simulation of ultrasonic Doppler System for Drilling mud Flow Measurements. Presented at: Day 2 Tue; 2024 Feb 13.
5. Bamberger J, Greenwood MS. Evaluation of Ultrasonic Methods for In-Situ Real-Time Characterization of Drilling Mud. [Conference/Report]. [Year not specified].
6. Zhang H, Tan C, et al. Online rheological measurement of dilute liquid-solid two-phase flow with ultrasound Doppler technique. Flow Meas Instrum. [Year not specified].
7. Garman M, Kadambi J, et al. Localized Particle Velocity and Concentration Measurement in Slurry Flow Using Ultrasound Technique. Flow Meas Instrum. 2013 Jul 6.

8. Tan C, Takeda Y, et al. Ultrasonic Doppler Technique for Application to Multiphase Flows: A Review. *Int J Multiphase Flow*. 2021 Oct 31.
9. Bareš V, Matoušek V, et al. Turbulent slurry flow measurement using ultrasonic Doppler method in rectangular pipe. [Journal/Conference not specified]. 2014 Feb 28.
10. Teran C, Vergara L, Varela R, Tarrés G, Escobar R. Monitoreo de derrumbes para la detección de la inestabilidad de pozo en la formación Vaca Muerta. 3er Congreso Latinoamericano y del Caribe de Perforación, Terminación, Reparación y Servicio de Pozos; 2017.
11. Barberii E. *El Pozo Ilustrado*. 4th ed. Bogotá: FONCIED; 1998.
12. Instituto Americano del Petróleo. *Manual de fluidos de perforación*. Dallas (TX): Instituto Americano del Petróleo; 2014.
13. Takeda Y. Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow. In: *Fluid Mechanics and its Applications*. Tokyo: Springer; 2012. doi:10.1007/978-4-431-54026-7.
14. Shourcheh SD, Rezazadeh G. Mechanical Analysis of Ultrasonic Flow Meter based on Doppler Effect. [Journal not specified]; 2016.

15. Mozie KN. Characterization of Ultrasonic Waves in Various Drilling Fluids. University College of Southeast Norway; 2017. Available from: [www.usn.no](http://www.usn.no).
16. Gommlich A, Schubert F. On Determination of Focal Laws for Linear Phased Array Probes as to the Active and Passive Element Size. 2016. Available from: <http://ndt.net/?id=19763>.
17. Azar L, Shi Y, Wooh SC. Beam focusing behavior of linear phased arrays. 1999. Available from: [www.elsevier.com/locate/ndteint](http://www.elsevier.com/locate/ndteint).
18. Razavi B. Design of CMOS Phase-Locked Loops: From Circuit Level to Architecture Level. Cambridge: Cambridge University Press; 2020. p. 216.
19. Soria-Olivas E, Martín-Guerrero J. A novel approach to introducing adaptive filters based on the LMS algorithm and its variants. IEEE Trans Educ. 2004.
20. Jain D. A Novel LMS Algorithm Applied to Adaptive Noise Cancellation with Varying Parameters. Int J Res Appl Sci Eng Technol. 2022.
21. Clarkson P. Optimal and Adaptive Signal Processing. [Journal not specified]; 1993.
22. Ravinchandra KA, Lau Chee Yong. Active Noise Reduction using LMS and FxLMS Algorithms. J Phys Conf Ser. 2019