

SISTEMA ACÚSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE
CORTES Y DERRUMBES EXTRAÍDOS DURANTE EL PROCESO DE
PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

LUIS FERNANDO RAMÍREZ SILVA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2016

SISTEMA ACÚSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE
CORTES Y DERRUMBES EXTRAÍDOS DURANTE EL PROCESO DE
PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

LUIS FERNANDO RAMÍREZ SILVA

Trabajo de investigación para optar al título de
Magister en ingeniería de sistemas e informática

Director

Ph.D ANA BEATRIZ RAMÍREZ SILVA

Codirector

MSc. JENNY MABEL CARVAJAL JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2016

Dedicatoria

A mi madre Amira Silva de quien siempre recibiré los mejores consejos y su apoyo incondicional.

A mi padre Luis Ramírez que me cuida desde el cielo.

A todos mis hermanos por que llenan de hermosos recuerdos mi vida.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por que confío en que Él ha estado presente en cada paso que he dado durante mi vida.

En segundo lugar a mi familia por su apoyo incondicional en cada una de las decisiones que he tomado en mi vida, tanto en la parte personal, como en la parte académica-laboral.

A mi directora Ana Ramírez y a mi co-directora Jenny Carvajal por su apoyo durante el desarrollo del tema de investigación.

Finalmente quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Julio Forero quien estuvo presente durante el desarrollo de cada experimento y gracias a su arduo trabajo, hizo posible la evaluación experimental del proyecto, y además a Hernán Mantilla, Robert Moerland y Jaime Loza, quienes hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	18
2. JUSTIFICACIÓN	29
2.2. OBJETIVO GENERAL	29
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	31
3.1. SISTEMA TEÓRICO EXPERIMENTAL	31
3.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN	34
4. DISEÑO DEL ENSAYO	36
4.1. PRUEBAS PRELIMINARES	36
4.2. MODELO EXPERIMENTAL	39
5. RESULTADOS.....	42
5.2. FLUJO VOLUMÉTRICO DE SÓLO LODO	48
5.3. FLUJO VOLUMÉTRICO DE ROCA Y LODO	52
5.4. ELEMENTOS DE SEGURIDAD PARA REALIZAR EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS EN POZO.....	58
6. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Preparación del lodo experimental.....	32
Tabla 2. Propiedades de los materiales para el tubo del experimento.....	34
Tabla 3. Observaciones de las pruebas preliminares	39
Tabla 4. Relación de ensayos.....	40
Tabla 5. Caso I. Cálculo de la velocidad del Agua.....	42
Tabla 7. Relación de diferentes concentraciones de roca y la masa usados en cada experimento.	53
Tabla 8. Relación entre la frecuencia, la concentración y el tamaño de la roca. ...	56
Tabla 9. Relación de la masa/concentración/velocidad y flujo volumétrico.....	58
Tabla 10. Resultados de la validación del modelo matemático de relación entre el cambio de frecuencia observado y la concentración de roca.	58
Tabla 11. Tipos de protección en equipos eléctricos	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de extracción de los cortes y derrumbes del pozo petrolero.....	18
Figura 2. Preparación del lodo de perforación para el experimento. Verificación y mantenimiento del PH y las propiedades del lodo.....	19
Figura 3. Cristal piezoeléctrico P tipo moneda.	20
Figura 4. Fenómeno piezo-electrico experimentado por los cristales PZT.	21
Figura 5. Comportamiento del cristal sobre una superficie cuando se ha excitado eléctricamente.	21
Figura 6. Flujo-metros ultrasónicos. a.) Tiempo de tránsito; b.) Efecto doppler; c.) Correlación cruzada; d.) Acústica pasiva.	22
Figura 7. Estimación del tiempo del primer arribo. La línea vertical separa la señal compresional de la señal de corte.	23
Figura 8. Cálculo del flujo basado en el tiempo de viaje de la señal.....	24
Figura 9. Arriba: Cristal cortado de 7x7mm sin efecto de borde. Abajo: Cristal de 25 mm de diámetro con efecto de borde	25
Figura 10. Representación del efecto doppler; una fuente en movimiento y dos observadores.	26
Figura 11. Efecto doppler a través de una tubería de PVC con lodo y rocas	26
Figura 12. Ejemplo de la Transformada discreta de Fourier de una señal.	28
Figura 13. Sistema para la medición de los derrumbes al final de la banda transportadora.	29
Figura 14. Sistema experimental para simular el proceso de transporte de derrumbes.....	31
Figura 15. Reómetro para la medición de la viscosidad del lodo, basado en las revoluciones.	33
Figura 16. Balanza de lodo para calcular la densidad del lodo (lb/gal).	33
Figura 17. Equipo para la medición del PH del lodo.....	33
Figura 18. Software para la adquisición automática de señales del osciloscopio.....	35
Figura 19. Configuración y alineación de los transductores. A.) Vista lateral del tubo. B.) Vista de planta del tubo.....	36
Figura 20. Montaje experimental de la tubería con los sensores (cristales longitudinales y transversales)	37
Figura 21. Señales obtenidas de las pruebas preliminares. A.) Tubo vacío. B.) Agua dentro del tubo. C.) Lodo dentro del tubo. D.) Lodo y rocas en el tubo.....	38
Figura 22. Izquierda: Reflexión de la señal generada por la señal acústica debido al drástico cambio en entre los dos medios. Centro y derecha: Refracciones de la señal en los diferentes medios con arribo en los diferentes receptores (R1 y R2).	38
Figura 23. Metodología de investigación.....	40

Figura 24. Foto de la válvula del experimento, en el programa Arcgis. La zona celeste equivale a la apertura de la válvula a 1/4.....	43
Figura 25. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el agua en movimiento. Señal que viaja del punto A hacia B: $T_{ab}=5.75e-05$ s.....	44
Figura 26. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con agua en movimiento. Señal que viaja desde el punto B hacia A: $T_{ba} = 5.77e-05$ s.....	44
Figura 27. Velocidad instantánea del agua a medida que se desplaza por el tubo. Velocidad instantánea medida usando el tiempo de arribo de las señales acústicas.....	45
Figura 28. Arriba: señales acústicas del transductor emisor. Abajo: Transformada de Fourier de las señales adquiridas. Frecuencia = $2.26e5$ Hz.	46
Figura 29. Acercamiento de la transformada de Fourier de 6 señales acústicas emitidas.	47
Figura 30. Velocidad instantánea del agua medida con el efecto doppler.....	48
Figura 31. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el lodo en movimiento. Señal desde A hacia B $t_{ab}=5.79e-05$ s.....	49
Figura 32. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el lodo en movimiento. Señal desde B hacia A. $t_{ba}=5.81e-05$ s.....	49
Figura 33. Arriba: Señales del transductor emisor. Abajo: Transformada de Fourier de la señal original	51
Figura 34. Acercamiento de la Transformada de Fourier en la zona de interés para las señales adquiridas.	51
Figura 35. Velocidad instantánea del lodo medida que el tanque se desocupa, usando efecto Doppler.	52
Figura 36. Cono para dirigir la ruta de los cavings hacia el tubo.	54
Figura 37. Izquierda: señales obtenidas en los 3 instantes de tiempo. Derecha: Transformadas de Fourier para cada señal adquirida.....	54
Figura 38. Señal acústica obtenida cuando se usa la mezcla lodo y roca. Visualización del cambio de fase.....	55
Figura 39. Izquierda: Cavings grandes (10-20mm). Derecha: Cavings pequeños (1-10mm)	56
Figura 40. Modelo acústico para la estimación de cavings/cortes a diferentes tamaños...	57
Figura 41. Equipo 4200-SCS de tektronix. Izquierda parte frontal del equipo. Derecha Parte posterior con amplificadores como accesorios.....	60
Figura 42. Cable coaxial para transmisión de datos.....	62
Figura 43. Arriba: Señales adquiridas. Abajo: Transformada de Fourier de las diferentes señales.....	69
Figura 44. Pulso generado por el trigger del equipo.....	70
Figura 45. Arriba: Señal adquirida con los ajustes. Abajo: Transformada de Fourier resultante.	71
Figura 46. Señal acústica con sus diferentes arribos. Franja azul: Pulso generado por el equipo. Franja amarilla: Señal que llega al receptor por el espesor del tubo de PVC. Franja verde: Señal que llega al receptor por el fluido. Franja roja: Segundo arribo de la señal.....	72

Figura 47. Señal acústica con sus diferentes arribos. Franja azul: Pulso generado por el equipo. Franja verde: Señal que llega al receptor por el fluido. Franja roja: Segunda señal que llega al receptor por el fluido. 73

Figura 48. Simulación en COMSOL multiphysics. Izquierda: Corte transversal del tubo, respuesta de la señal a través de un fluido. Derecha: Comportamiento de la señal a través del espesor del PVC. 73

GLOSARIO

Atenuación: pérdida de potencia que sufre una señal al atravesar diferentes medios.

Conmutador (switch): dispositivo digital lógico de interconexión de equipos que opera en la capa de enlace de datos del modelo OSI. Su función es interconectar dos o más segmentos de red, de manera similar a los puentes de red, pasando datos de un segmento a otro de acuerdo con la dirección MAC de destino de las tramas en la red.

Cortes (Cuttings): Pequeños trozos de roca que se desprenden debido a la acción del taladro durante el proceso de perforación.

Densidad: relación que existe entre la masa de un cuerpo y su volumen.

Derrumbes (Cavings): Pedazos de roca que caen de la pared del pozo perforado, que no fueron removidos directamente por la broca y se presentan como resultado de la desestabilización de la roca durante la perforación.

Dureza de un material: es la oposición que ofrece el material a ser rayado.

Impedancia acústica: es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este. Esta puede calcularse al multiplicar la densidad por la velocidad de propagación del sonido en ese medio.

Línea de flujo: Tubería por donde se transporta el lodo de perforación con los cortes y derrumbes.

Lodo de perforación: fluido utilizado durante la perforación para transportar el material rocoso sobrante del interior del pozo al exterior de éste.

Módulo de Young: Es la relación que existe entre el esfuerzo aplicado a una muestra (rocosa) y la deformación que ésta sufre en la dirección del esfuerzo principal.

Osciloscopio: instrumento de visualización electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo.

Pulsador o generador de pulsos: instrumento electrónico que genera señales eléctricas cuadradas (las señales generadas pasan de cero a un voltaje definido en cierto valor de tiempo).

Reflexión acústica: fenómeno por el cual una onda se absorbe o regresa. Esto ocurre cuando una onda se encuentra con un medio el cual no puede atravesar o

traspasar. Las condiciones del ángulo con el que la onda se refleja están condicionadas al medio y al ángulo con el que llegó (ley de Snell).

Refracción: fenómeno por el cual una onda cambia su ángulo en su viaje al cambiar de un medio a otro. Las condiciones del ángulo con el que la onda se refracta están condicionadas al medio y al ángulo con el que llegó (ley de Snell).

Relación de Poisson: Es la relación que existe entre la deformación circunferencial de una muestra (rocosa) y su deformación axial.

Roca: Material de estudio, constituida por uno o varios minerales, materia orgánica, materia inorgánica; cuya composición química es variable, sin forma geométrica definida y formada como resultado de un proceso geológico.

Señal P o señal compresional: también conocida como señal primaria; señales mecánicas no orientadas, que se propagan en la dirección del desplazamiento de las partículas.

Señal S o señal de corte: también conocida como señal secundaria; señales mecánicas orientadas, que se propagan perpendicularmente a la dirección del desplazamiento de las partículas. Su orientación define hacia cuál de los planos perpendiculares se propaga.

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA ACÚSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE CORTES Y DERRUMBES EXTRAÍDOS DURANTE EL PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS.*

AUTOR: Luis Fernando Ramírez Silva.**

PALABRAS CLAVE: Acústica, Efecto Doppler, Flujo volumétrico, Estimación de cortes y derrumbes, Estabilidad de pozo.

DESCRIPCIÓN:

La estimación del flujo volumétrico de cortes y derrumbes que son extraídos durante la perforación de pozos petroleros y transportados por el lodo de perforación dentro de la tubería final, es el principal interés para mantener la estabilidad del pozo. Métodos tradicionales utilizan un sistema mecánico que se encarga de medir el tamaño y el peso de la roca, pero este método es inexacto debido a que la roca está impregnada con lodo, lo cual hace que ésta se adhiera a las bandejas de medición y además, estos equipos no tienen la capacidad suficiente para medir este caudal. En este trabajo, se propone un método acústico no invasivo que utiliza dos cristales piezo eléctricos ubicados en la tubería de transporte, uno de ellos actúa con el rol de sensor emisor; y el otro de ellos como sensor receptor. Además, este documento presenta la forma en que los experimentos se hicieron y las diferentes tecnologías utilizadas. El método propuesto puede ser utilizado para estimar el flujo volumétrico de los derrumbes utilizando el Efecto Doppler. En éste trabajo, se describe la configuración y propuesta experimental y además se muestra que para derrumbes pequeños, el máximo error obtenido en el cálculo del flujo volumétrico es del 10.5% y para derrumbes de tamaño grande, el máximo error encontrado es del 34.7%. Finalmente el documento muestra las alternativas de mejora en la parte instrumental con el fin de disminuir los porcentajes de error señalados.

* Trabajo de Maestría

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Ana Ramírez, PhD Ingeniería eléctrica.

ABSTRACT

TITLE: ACOUSTIC SYSTEM TO ESTIMATE THE VOLUMETRIC FLOW OF CUTTINGS AND CAVINGS EXTRACTED DURING THE WELLBORE PERFORATION PROCESS.*

AUTHOR: Luis Fernando Ramírez Silva.**

KEY WORDS: Acoustics, Doppler Effect, Volumetric flow, Cavings and Cuttings estimation, wellbore stability.

DESCRIPTION:

Estimating the volumetric flow of cuttings and cavings that are extracted during the well bore drilling and transported by the drilling mud into the flow line is of major interest to maintain the stability of the well bore. Traditional methods use a mechanical system that measures the size and weight of the rock, but this method is inexact because of the rock is impregnated with mud, as well as difficult because the mud partially stays in the measurement equipment, and furthermore, these instrument do not have sufficient capacity to measure the flow. In this work is proposed a non-invasive acoustical method that uses two piezo-electric acoustic sensors located on the flow line, one acting as an emitter and one acting as receiver. In addition this documents presents how did the experiments was made and the different technology used. The proposed method can be used to estimate the volumetric flow of cavings via Doppler Effect. In this work, is described the proposed experimental setup and is showed that for small cavings, the maximum volumetric flow error is 10.5% and for large size cavings, the maximum volumetric flow error is 34.7%. Finally, the document shows an alternative instrumental improvement in order to reduce the percentages indicated error.

* Master Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Ana Ramírez, PhD Ingeniería eléctrica.

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos se extraen diariamente cientos de miles de barriles de petróleo, los cuales, una vez son procesados en las diferentes refinerías, se convierten en el motor que impulsa el planeta, ya sea movilizándonos o dando energía a las industrias.

Durante la extracción del hidrocarburo, existe un proceso conocido como perforación del pozo petrolero, el cual consiste en atravesar el subsuelo rocoso hasta llegar a la formación que contiene el hidrocarburo (ya sea gas o petróleo).

En el proceso de perforación, geólogos, geomecánicos e ingenieros, se encargan de controlar que el pozo perforado se mantenga estable, de manera que se puedan reducir o disminuir los costos asociados a la perforación y los riesgos que ésta implica. Una de las actividades de los profesionales encargados de la perforación es garantizar, controlar y asegurar que todo el material rocoso cortado por la broca a medida que avanza en el proceso de perforación, sea evacuado del pozo, evitando así que se presente algún tipo de taponamiento por acumulación de material.

Adicionalmente, los profesionales en geomecánica tienen entre sus funciones, vigilar continuamente la estabilidad de la pared del pozo, evitando en lo posible, el derrumbe de ésta. En particular, un método empleado para controlar la estabilidad del pozo, consiste en medir la cantidad de roca que se ha extraído a la superficie y en base a esta medida, determinar si la pared del pozo se está derrumbando o se encuentra estable.

Este trabajo de investigación estudia métodos acústicos que permiten estimar el flujo volumétrico de roca extraída a la superficie del pozo. Particularmente, se utilizan señales de ultrasonido de forma no-invasiva, para determinar la cantidad de roca y lodo fluyendo dentro de un tubo. Para poder realizar este estudio a nivel de laboratorio, se utilizó un experimento a pequeña escala que simula el proceso de transporte de cortes y cavings en un proceso típico de limpieza del pozo.

En este documento se encuentran seis capítulos organizados así: En el capítulo 1 se presenta la teoría general que enmarca este trabajo de investigación. El segundo capítulo describe la justificación del problema que abarca esta tesis y los objetivos generales y específicos que fueron aprobados para este trabajo de investigación. En el capítulo tres se presenta el diseño del experimento y los elementos de laboratorio a ser utilizados. En el cuarto capítulo se desarrolla la metodología del

experimento de laboratorio y algunas pruebas preliminares realizadas al sistema acústico implementado. El capítulo 5 presenta los resultados de estimación de flujo volumétrico de roca que se obtuvo en este trabajo de investigación. Por último, el capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado. Este documento cuenta con una sección de anexos donde se describen detalles teóricos que pueden ser de interés para el lector.

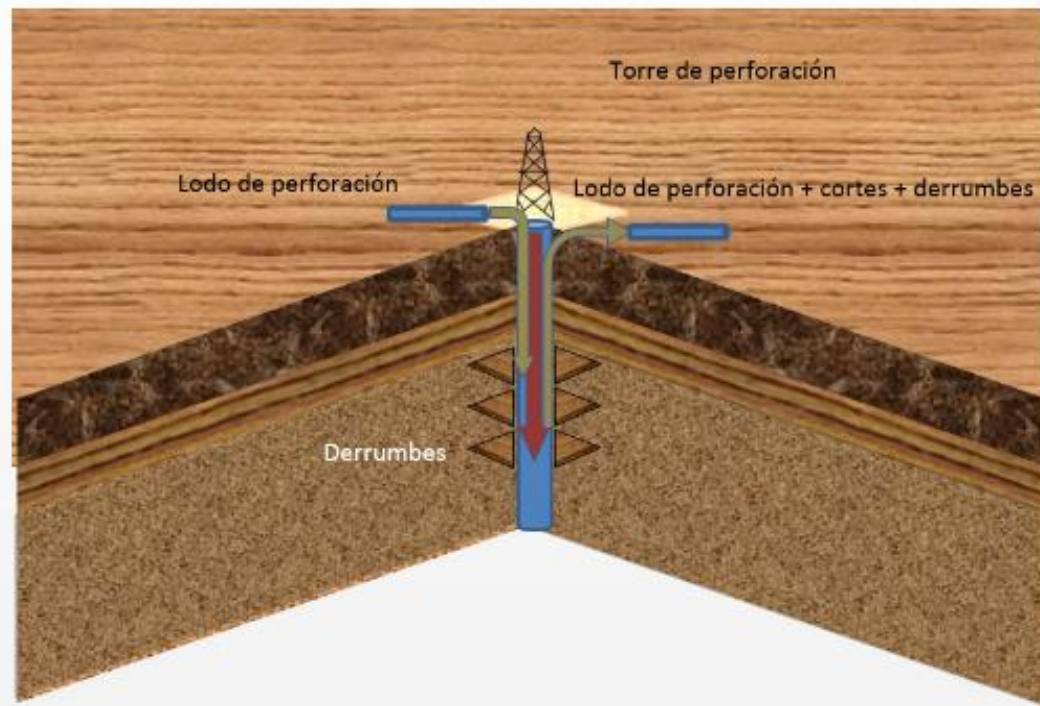
1. MARCO TEÓRICO

1.1. PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO

El petróleo que se encuentra en el subsuelo se extrae por medio de pozos productores que son perforados en el proceso de explotación de petróleo. Durante la perforación, es importante el control y mantenimiento del pozo, debido a que una buena administración del mismo puede evitar que ocurran problemas operacionales o incluso evitar problemas de estabilidad del hueco e incidentes ambientales. Durante la etapa de perforación se utilizan fluidos para evacuar pedazos de rocas evitando que éstos generen algún tipo de bloqueo.

Mientras la broca descende a través del pozo perforando el subsuelo, se va generando cierta cantidad de cortes y en algunos casos, derrumbes originados por la desestabilización de la pared del hueco. Para controlar la estabilidad del pozo se debe conocer la cantidad en gramos o el total volumétrico de los derrumbes y cortes que se generaron durante la perforación; ya que con esta información se puede estimar la condición de la pared del pozo perforado, y a su vez la estabilidad del mismo. La figura 1 muestra un ejemplo del proceso de inyección del lodo, al igual que el proceso de extracción de lodo, cortes y derrumbes.

Figura 1. Proceso de extracción de los cortes y derrumbes del pozo petrolero.



1.1.1. Lodo de perforación:

Es una suspensión de arcilla en agua (o aceite), que con los aditivos necesarios se encarga de las siguientes funciones en el proceso de perforación de pozos petroleros:

- Transportar los cortes y derrumbes del pozo.
- Refrigerar la herramienta de corte.
- Sostener las paredes del pozo.

Durante el desarrollo de este proyecto, se profundizará en la primera función del lodo, la cual se encarga de transportar los cortes y derrumbes del pozo. Para el experimento de laboratorio utilizado en esta investigación, se preparó lodo de perforación con las mismas características del lodo usado en campo y se mantuvo estas características durante todo el experimento. La figura 2 presenta una fotografía de la verificación y mantenimiento del PH del lodo usado durante el experimento de laboratorio propuesto para esta investigación.

Figura 2. Preparación del lodo de perforación para el experimento. Verificación y mantenimiento del PH y las propiedades del lodo.



Fuente: Laboratorio de daños a la formación

1.2. ONDAS ACÚSTICAS

Debido a que este trabajo de investigación estudia el problema de estimación del flujo volumétrico de roca a través del uso de acústica, es importante definir los tipos de señales acústicas. En particular existen dos tipos de señales acústicas que se

propagan sobre los materiales de interés en este trabajo: señales de compresión (ó señal P) y señales de corte (o señales S).

Las señales P (u ondas longitudinales) son señales no orientadas y se propagan en la dirección del desplazamiento de las partículas. Estas señales se propagan en medios sólidos y líquidos; un ejemplo de este tipo de señal se puede observar cuando se arroja una piedra al agua. Las ondas producidas por el golpe de la piedra viajarán hacia afuera, donde se produjo el choque de la roca con el agua, es decir, las ondas se propagan en la dirección del desplazamiento de las partículas del agua.

Por otro lado, las señales S (u ondas transversales), son señales orientadas y se propagan perpendicularmente al desplazamiento de las partículas. Estas señales a diferencia de las señales P, sólo pueden propagarse en medios sólidos.

Las ondas sonoras (P y S) viajan a través de los materiales a diferentes velocidades. Así que, conociendo la velocidad a la que se propaga una onda, se puede estimar el tipo de material presente en el medio de propagación y algunas de sus propiedades físicas. Además, si el material posee defectos en su interior, la velocidad de propagación del sonido en ese material varía y es posible determinar donde se encuentran estos defectos.

1.3. CRISTALES PIEZO-ELÉCTRICOS

Los cristales piezo-eléctricos son cristales cortados generalmente en forma cilíndrica (como se muestra en la figura 3), de material de cuarzo, los cuales se utilizan para producir o generar las ondas acústicas de tipo compresional o de corte (según el corte del material, se generarán diferentes tipos de ondas).

Figura 3. Cristal piezoeléctrico P tipo moneda.

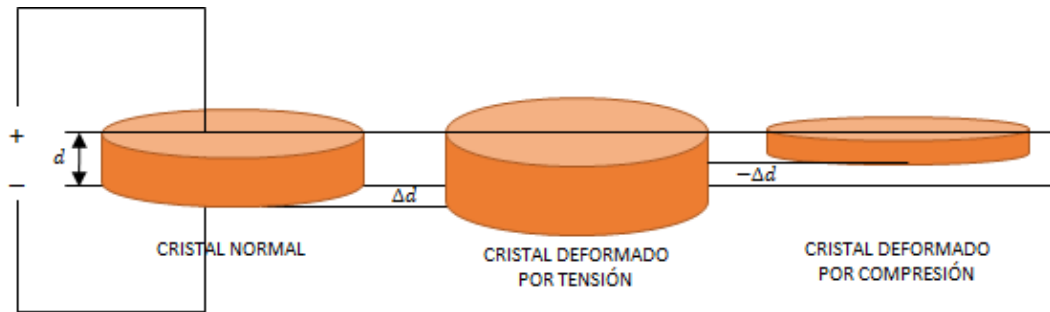


Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas

1.4. PIEZO-ELECTRICIDAD Y ELECTROSTRICCIÓN

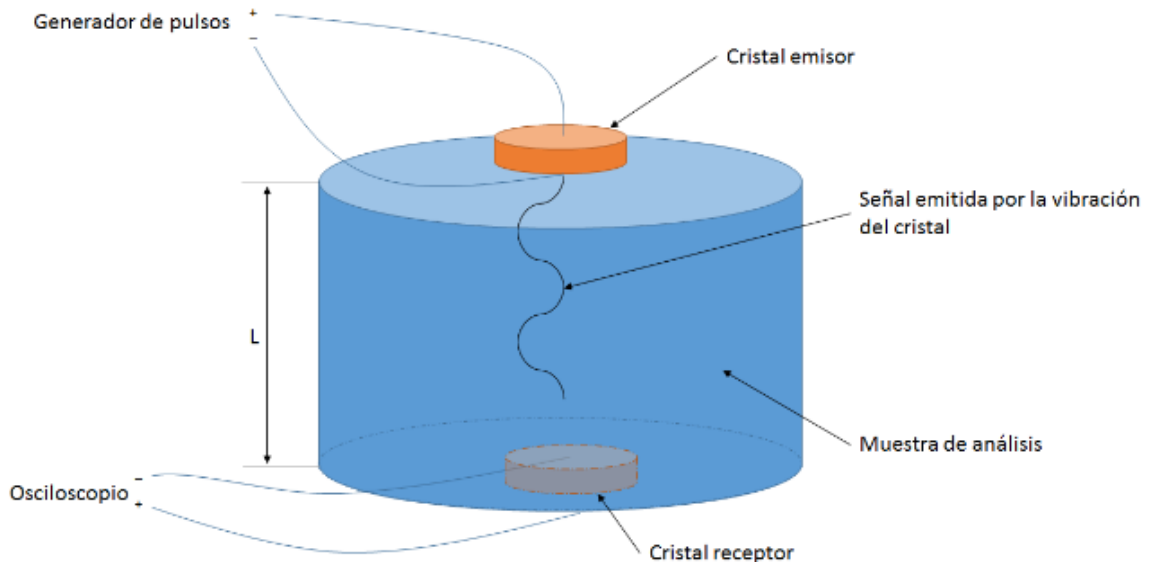
Por medio de la generación de un pulso eléctrico, el cristal se deforme, haciendo que éste vibre a una frecuencia fundamental (o frecuencia natural del piezoelectrico. Ver figura 4).

Figura 4. Fenómeno piezo-electrico experimentado por los cristales PZT.



Cuando el cristal es adherido a una superficie de cualquier material, transfiere su vibración en forma de ondas de presión al material al cual está adherido. La figura 5 muestra un ejemplo de un experimento donde dos cristales (uno emisor y otro receptor) son ubicados en cada extremo del material rocoso de análisis. El cristal emisor es conectado a un generador de pulsos y el cristal receptor que detecta la onda de presión que viaja a través del material en estudio es conectado al osciloscopio.

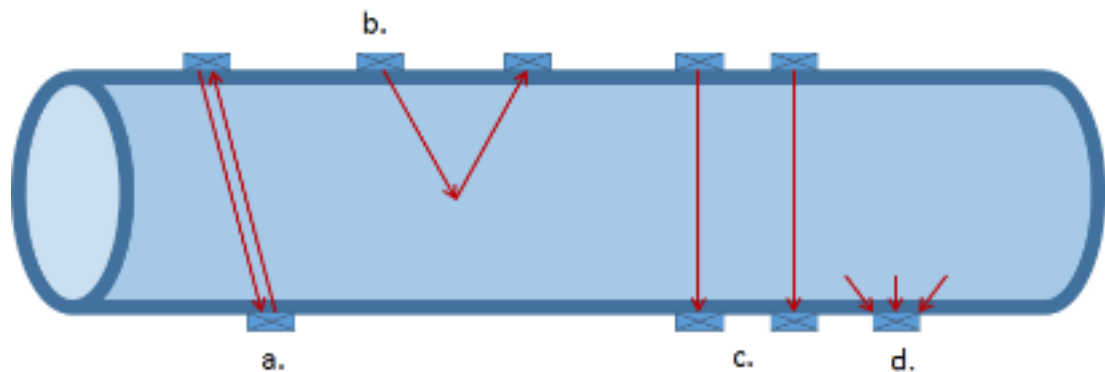
Figura 5. Comportamiento del cristal sobre una superficie cuando se ha excitado eléctricamente.



1.5. MEDIDORES DE FLUJO

Algunas técnicas de ultrasonido pueden ser usadas para medir flujo volumétrico debido a los efectos que se generan cuando las señales de ultrasonido entran en contacto con el fluido en movimiento. Entre las técnicas que usan ultrasonido y que se pueden encontrar en la literatura para calcular el flujo volumétrico de un fluido se encuentran: tiempo de tránsito, efecto doppler, correlación cruzada, acústica pasiva, entre otros.

Figura 6. Flujo-metros ultrasónicos. a.) Tiempo de tránsito; b.) Efecto doppler; c.) Correlación cruzada; d.) Acústica pasiva.



En el ejemplo que se muestra en la figura 6a, se determina el tiempo que tarda la señal en viajar de un transductor al otro y luego se compara con el tiempo que tarda la señal en regresar cambiando el cristal emisor por el cristal receptor y viceversa. Para el segundo método (ver figura 6b), se determina el cambio de frecuencia que se genera cuando una partícula que se encuentra en movimiento refleja la onda acústica emitida, basándose en el efecto doppler.

El tercer caso (ver figura 6c) consiste en generar una correlación entre las dos señales adquiridas que se encuentran en paralelo. El último caso (ver figura 6d), consiste en un cristal (o transductor) ultrasónico ubicado en el tubo como receptor, sin ninguna fuente de excitación; el análisis consiste en identificar la señal que se genera naturalmente por el proceso de movimiento del fluido.

1.6. MEDICIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO USANDO EL TIEMPO DE ARRIBO DE LA SEÑAL ACÚSTICA

La velocidad de propagación de la onda en el material de estudio, es una de las principales características de interés. Esta velocidad se puede determinar encontrando el tiempo del primer arribo de las señales sonoras (P y S) y conociendo

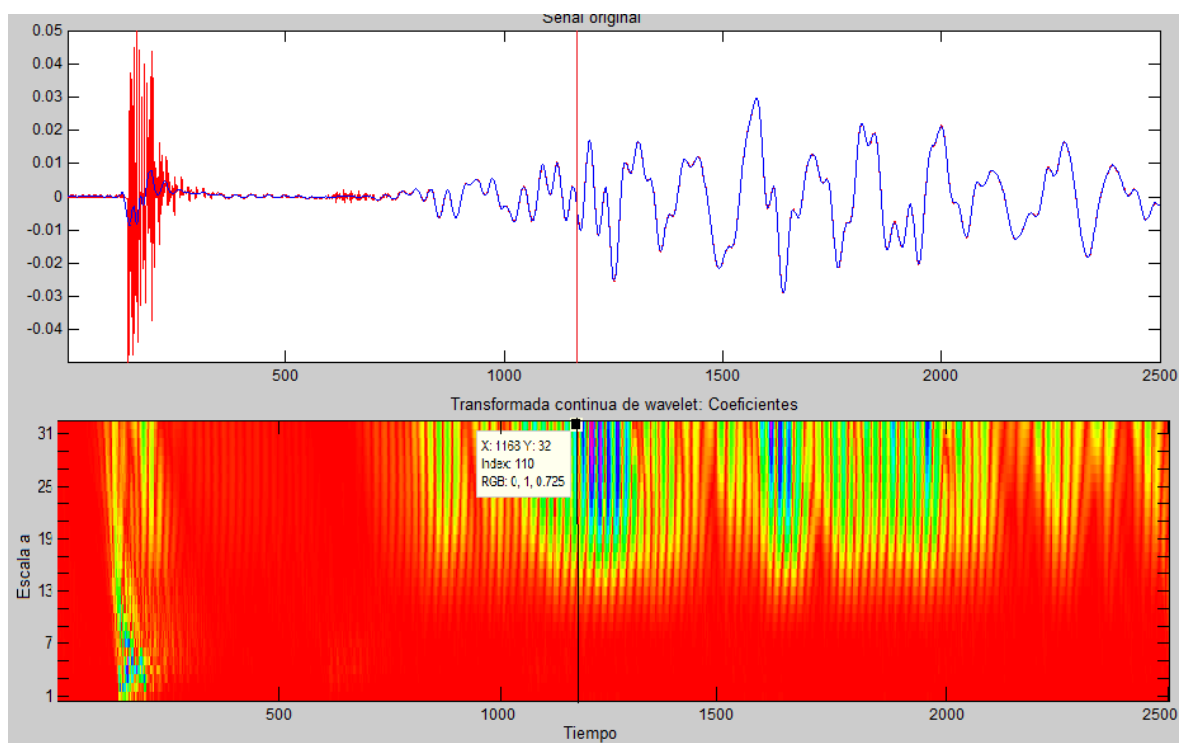
las trayectorias de propagación de las ondas a través del material. El procedimiento para determinar el tiempo de primer arribo se conoce como proceso de picado (o picking).

Uno de los métodos comúnmente utilizados para determinar el primer arribo de la señal acústica es la transformada continua wavelet.

La transformada wavelet se utiliza para determinar el tiempo del primer arribo de las ondas propagadas por el material. El primer tiempo de arribo para las señales P suele ser muy sencillo de identificar. Se caracteriza por encontrarse en donde se genera la primera cresta de la señal.

La figura 7 presenta un ejemplo del uso de la transformada wavelet para el cálculo del tiempo de llegada de las señales P y S.

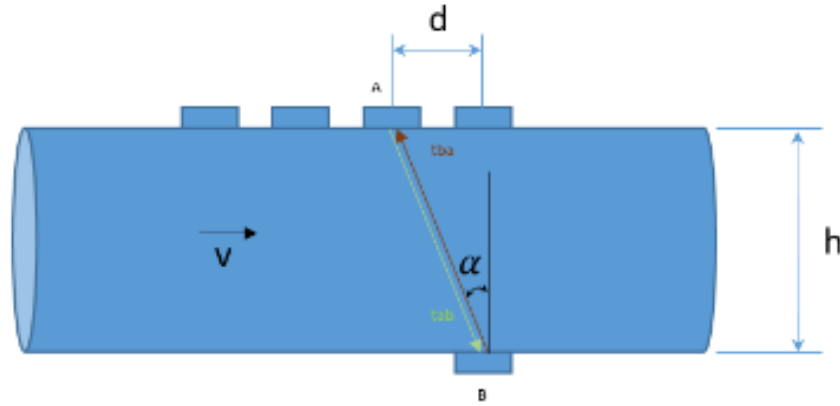
Figura 7. Estimación del tiempo del primer arribo. La línea vertical separa la señal compresional de la señal de corte.



Asumiendo que tenemos dos cristales (o sensores piezo-eléctricos) conectados enfrentados en un tubo (localizados en A y B como se ilustra en la figura 8), es posible calcular el flujo volumétrico que pasa a través del tubo en un instante de tiempo basado en la relación que existe entre el tiempo que tarda una señal en viajar

por un medio líquido que se encuentra en movimiento y en regresar nuevamente por el mismo camino.

Figura 8. Cálculo del flujo basado en el tiempo de viaje de la señal



Primero se debe determinar el ángulo $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{d}{h}\right)$, donde d y h corresponden a la separación de los cristales A y B. Además de deben encontrar los tiempos tab , y tba que corresponden a los tiempos que tarda la señal acústica en viajar de A hasta B, y de B a A, respectivamente. Estos tiempos se pueden determinar utilizando el método de *picking* que usa la transformada wavelet, tal como se describió previamente.

Una vez que se tienen los tiempos de viaje de la señal, se puede determinar la velocidad del fluido (metros por segundo) de la siguiente forma:

$$v_f = \left(\frac{L}{2\cos(\alpha)}\right) \left(\frac{tab - tba}{tab * tba}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Para calcular el caudal o el flujo (metros cúbicos por segundo) que pasa a través de la tubería en un instante de tiempo, sólo basta multiplicar la velocidad obtenida por el área de la tubería:

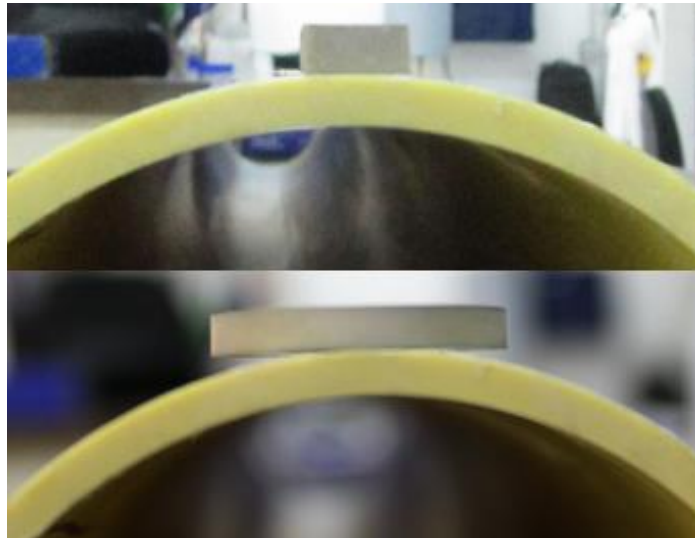
$$Q = v_f * A \quad \text{Ecuación 2}$$

1.6.1. Sensibilidad de los cristales

Los cristales ultrasónicos que serán usados en el experimento a nivel de laboratorio, tienen una frecuencia fundamental de vibración de 600Khz. Sin embargo, cuando se realiza un corte al cristal para evitar el efecto borde que se genera al adherir el cristal a la superficie del tubo de PVC (ver figura 9), la frecuencia natural de

oscilación cambia. Cuando la cara del cristal no hace un contacto adecuado con la superficie de tubo (para el caso experimental a tratar, es un tubo en PVC), genera vibraciones anómalas del cristal y se observan señales incoherentes al cristal receptor.

Figura 9. Arriba: Cristal cortado de 7x7mm sin efecto de borde. Abajo: Cristal de 25 mm de diámetro con efecto de borde



Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas.

Cuando los cristales han sido cortados de tal forma que se elimina el efecto de borde, su frecuencia natural de oscilación es aproximadamente de 220 kHz.

1.7. MEDICIÓN DE FLUJO VOLUMÉTRICO USANDO EFECTO DOPPLER

Se define como el cambio que ocurre en la frecuencia que percibe un observador (receptor) de una fuente (emisor) la cual se encuentra en movimiento.

En la figura 10 se ilustra una fuente en movimiento la cual se representa con la letra E. Esta fuente se dirige hacia el primer observador (R1) a una velocidad v y a su vez, se aleja de otro observador (R2) que se encuentra en la dirección opuesta al primero. Para el ejemplo de la figura 10, el receptor R1 observa una señal acústica de mayor frecuencia que la que observa el receptor R2.

Figura 10. Representación del efecto doppler; una fuente en movimiento y dos observadores.



El efecto doppler puede ser descrito para una fuente emisora y un receptor observador de la siguiente forma:

$$f_d = f - f_o = \left(\frac{-v_{rs}}{c} \right) f_o \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

c , es la velocidad del sonido en el medio (m/s).

v_{rs} , es la velocidad relativa del receptor con respecto a la fuente (m/s): $v_r - v_s$

v_s , es la velocidad de la fuente con respecto al medio (m/s). En éste caso $v_s = 0$.

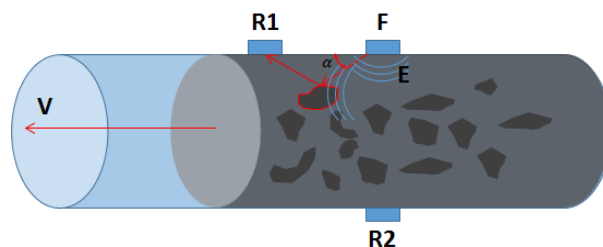
f , es la frecuencia del observador (Hz)

f_o , es la frecuencia del emisor / o de la fuente (Hz)

f_d , es la frecuencia relativa entre el receptor y el emisor (Hz).

Para el experimento de estudio en esta tesis, el efecto Doppler permite verificar la velocidad a la que se desplaza una roca dentro de lodo de perforación a través de un tubo de la siguiente forma: la fuente y el receptor serán cristales piezo-eléctricos de cuarzo cortados, con una frecuencia fundamental de aproximadamente 220 kHz. En este caso, la fuente emite una señal ultrasónica, la cual viaja a través del lodo de perforación. Una vez la fuente encuentra el material rocoso, es refractada en todas las direcciones. Esta roca se convierte entonces en el emisor. Debido a que la roca viaja por el tubo a una cierta velocidad como se observa en la figura 11, el cristal receptor observa una señal acústica de frecuencia diferente a la que fue emitida.

Figura 11. Efecto doppler a través de una tubería de PVC con lodo y rocas



Es indispensable tener en cuenta un parámetro adicional en el cálculo de la frecuencia Doppler, el cual es el ángulo que existe entre la fuente y la roca.

Incluyendo este parámetro se puede reescribir la ecuación 3 de la siguiente forma:

$$f_d = \left(\frac{2f_0 v_r}{c} \right) \cos(\alpha) \quad \text{Ecuación 4}$$

De la ecuación 4 se puede despejar la velocidad con la que se mueve la roca de la ecuación 4 y se obtiene:

$$v = \left(\frac{f_d c}{2f_0 \cos(\alpha)} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Para poder determinar la frecuencia de la señal que se recibe en un cristal receptor, se utiliza la transformada discreta de Fourier que permitirá discriminar una frecuencia mínima observable, la cual depende del número de muestras adquiridas, y de la frecuencia de muestreo. Cada una de las señales recibidas tendrán la siguiente notación: 1) la señal R1 adquirida en el cristal consecutivo al cristal emisor se denomina $P(t)$; y 2) la señal R2 adquirida en el cristal enfrentado al cristal emisor se denomina $P'(t)$

Se tiene entonces la siguiente información de $P(t)$ y $P'(t)$:

El tiempo de muestreo t_s en segundos está dado por:

$$t_s = \frac{t_v}{N} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

t_v , tiempo total de la ventana en la adquisición en segundos.

N , número de muestras adquiridas por el osciloscopio.

Adicionalmente, conociendo la frecuencia de muestreo f_s (Hz) se puede determinar la frecuencia máxima f_{max} (Hertz) que se puede observar usando la transformada discreta de Fourier. Esta frecuencia máxima está dada por la ecuación 8:

$$f_s = \frac{1}{t_s} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} \quad \text{Ecuación 8}$$

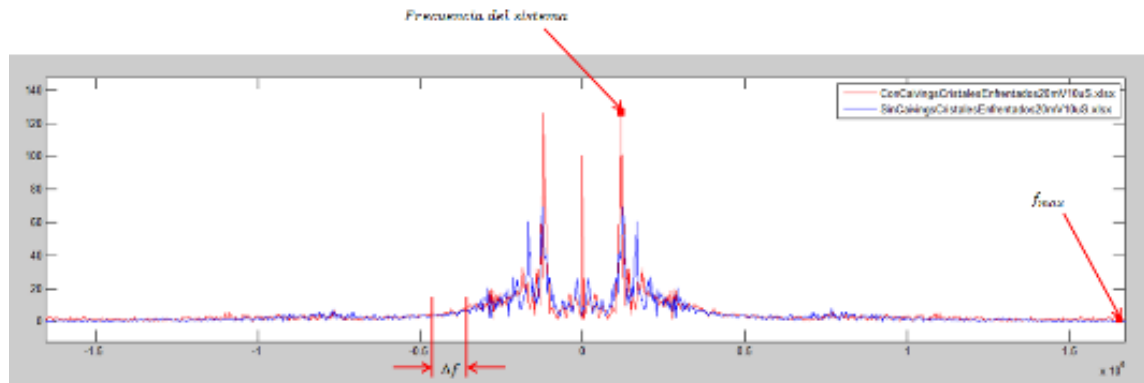
Finalmente, se puede establecer el cambio de frecuencia mínimo en (Hz) de las señales $P(t)$ y $P'(t)$, el cual está dado por

$$\Delta f = \frac{2f_{max}}{N}$$

Ecuación 9

La figura 12 muestra un ejemplo de la transformada de Fourier de una señal acústica, donde se resaltan la frecuencia fundamental de oscilación, la frecuencia máxima a observar y el cambio mínimo en frecuencia observable.

Figura 12. Ejemplo de la Transformada discreta de Fourier de una señal.



2. JUSTIFICACIÓN

2.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el método utilizado para medir el volumen de los cortes y derrumbes generados durante la perforación de pozos petroleros genera inconvenientes de portabilidad, instalación y además requiere de continuo mantenimiento. Adicionalmente, este equipo, no tiene capacidad para medir todo el caudal transportado, y las actualizaciones al mismo dependen del tipo de pozo donde será instalado, y requieren demasiado tiempo, esfuerzo y dinero. Un ejemplo de este equipo se observa en la figura 13.

Figura 13. Sistema para la medición de los derrumbes al final de la banda transportadora.



Tomado de: www.drillingcontractor.org/advances-in-high-performance-drilling-fluids-enhance-wellbore-strength-help-curb-loss-6426

Este trabajo de investigación se enmarca en el estudio de métodos alternativos para la estimación del flujo volumétrico de roca. En particular, el método alternativo que se desea explorar en esta investigación es el uso de señales acústicas. La hipótesis de este trabajo es que es posible crear un sistema basado en señales acústicas de ultrasonido (adquisición, pre y pos-procesamiento de señales acústicas) para estimar el flujo volumétrico de los cortes y los derrumbes.

2.2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de adquisición y procesamiento acústico que permita estimar el flujo volumétrico de los cortes y derrumbes transportados por el lodo de perforación, durante el proceso de perforación de pozos petroleros utilizando señales ultrasónicas.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Implementar un sistema experimental que simule el transporte de cortes, derrumbes y lodo en la línea de flujo, que se realiza durante la perforación de pozos petroleros.
- ii. Diseñar e implementar un sistema de adquisición de ondas acústicas transversales y longitudinales para el sistema experimental, considerando las restricciones de seguridad y operación de los pozos petroleros.
- iii. Implementar un algoritmo basado en el efecto Doppler para el procesamiento de las señales ultrasónicas que permita estimar el flujo volumétrico del sistema experimental.
- iv. Verificar el resultado del flujo volumétrico obtenido con el sistema propuesto con las cantidades de flujo volumétrico usadas en el experimento.

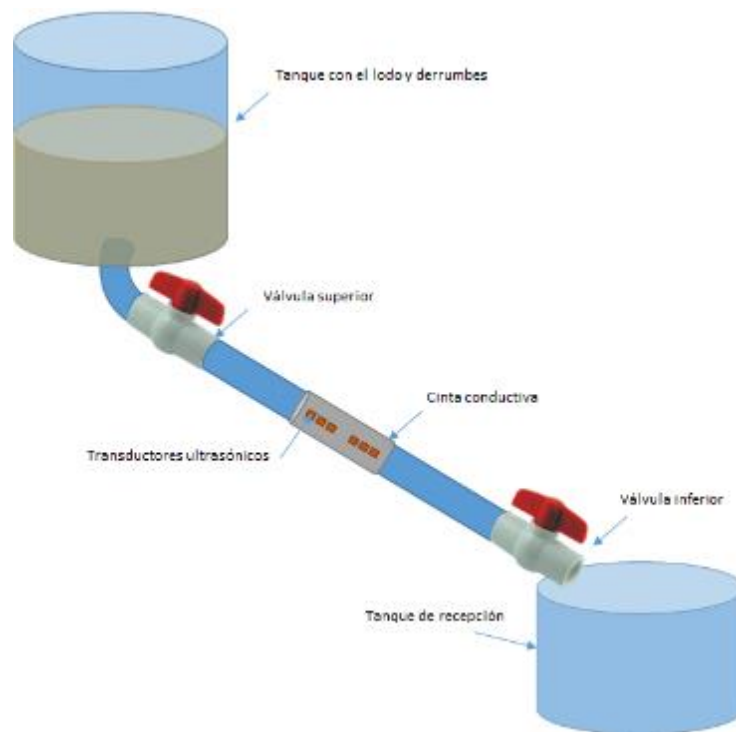
3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

3.1. SISTEMA TEÓRICO EXPERIMENTAL

Se propone un sistema experimental que consta de un tanque inicial en donde se encuentra el lodo de perforación junto con los cortes y derrumbes. El fluido se desplazará a través de una tubería de 3 pulgadas de diámetro interior. Una válvula controlará la cantidad de fluido que pasará a través de la tubería antes de llegar al sistema de medición acústica (ver figura 14).

El sistema de medición acústica es un conjunto de cristales que serán utilizados para estimar el flujo volumétrico de roca y lodo que pasa a través de la sección transversal del tubo en un determinado tiempo. Finalmente, la mezcla de lodo y cortes terminará su recorrido en una bandeja de recepción.

Figura 14. Sistema experimental para simular el proceso de transporte de derrumbes.



Dos válvulas se resaltan en el sistema experimental de la figura 14, ya que éstas ayudarán a controlar la velocidad a la que se desplazará el fluido del tanque superior al interior del tubo (válvula superior) y la velocidad a la que saldrá del tubo al tanque de recepción (válvula inferior).

3.1.1. Información de los elementos del sistema experimental

- **Transductores:** cristales piezo-eléctricos de cuarzo de tipo compresional y de corte con una frecuencia fundamental de vibración de 600kHz, los cuales al ser cortados tendrán una frecuencia de oscilación aproximada de 220 kHz (Emisores y receptores).
- **Generador de pulsos:** generador que permite obtener pulsos cuadrados de 300 Vpp de amplitud.
- **Lodo de perforación** (base agua): La *viscosidad plástica* del lodo del experimento es: 28 cP (ver figura 15).

La *densidad* aproximada del lodo: 8.5 lb/gal, equivalentes a 1018.32 kg/m³. Para realizar estos cálculos se utiliza una balanza de lodo como se muestra en la figura 16.

El *PH* del lodo a utilizar en el experimento será igual a 9. El cálculo el PH del lodo se obtuvo a través de un phmetro, como se observa en la figura 17.

Además, utilizando los sensores ultrasónicos se obtuvo una velocidad de propagación de la señal acústica en el lodo de aproximadamente 1603.989 m/s. Por último, se utilizó un químico denominado Calyseal para evitar que la roca se deshaga dentro del lodo.

Se usó también El PAC (R) y el PAC (L) como controladores de la viscosidad del fluido (o gelificadores). La viscosidad del lodo permite sostener los cortes y derrumbes que viajan dentro de éste.

Tabla 1. Preparación del lodo experimental

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES		
MATERIAL	CANTIDAD (lb/barril)	TIPO DE MATERIAL
<i>Bentonita</i>	13	Arcilla
<i>Clayseal Plus</i>	5	Inhibidor
<i>PAC (R) Plus</i>	3	Controlador
<i>PAC (L) Plus</i>	3	Controlador

Figura 15. Reómetro para la medición de la viscosidad del lodo, basado en las revoluciones.



Figura 16. Balanza de lodo para calcular la densidad del lodo (lb/gal).



Figura 17. Equipo para la medición del PH del lodo.



- **Material del tubo del experimento:** El tubo usado en el experimento propuesto en este trabajo de investigación es de material PVC de 3 pulgadas de diámetro con espesor de 2 mm. Para seleccionar el tipo de tubo del experimento, se requiere un material que tenga una velocidad de propagación cercana a la velocidad de propagación del lodo y así evitar que la onda no se refleje (disminuir la impedancia entre los materiales). Se selecciona entonces el material PVC como el material más adecuado para el experimento. La Tabla 2 lista algunos materiales con velocidades de propagación más cercanas a la velocidad del lodo.

Tabla 2. Propiedades de los materiales para el tubo del experimento.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES		
MATERIAL	VELOCIDAD (m/s)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)
<i>Fibra de vidrio</i>	2740	1000
<i>Nylon</i>	2600	220
<i>Polietileno (Alta densidad)</i>	2460	137
<i>Polietileno (Baja densidad)</i>	2080	115
<i>Policloruro de vinilo (PVC)</i>	1390	90
<i>Poliestileno</i>	2340	240

- **Tanque inicial:** se selecciona un tanque de acero de 40cm de diámetro x 60 cm de largo. En este tanque se alojará la mezcla de lodo, cortes y derrumbes, antes de pasar por el tubo.
- **Tanque de recepción:** se selecciona un tanque de acero de 40cm de diámetro x 30 cm de largo.
- **Adherente de cristales:** epóxico de plata Hysol, adherente epóxico elástico de marca topex o pegante instantáneo marca loctite. Se utilizan para permitir que la señal generada por el cristal se transmita a la tubería de PVC y luego a través del lodo. Se debe tener en cuenta que para utilizar el epóxico elástico, o el pegante instantáneo, es necesario instalar una cinta conductiva entre el cristal y la tubería con el fin de no perder la polarización del cristal.

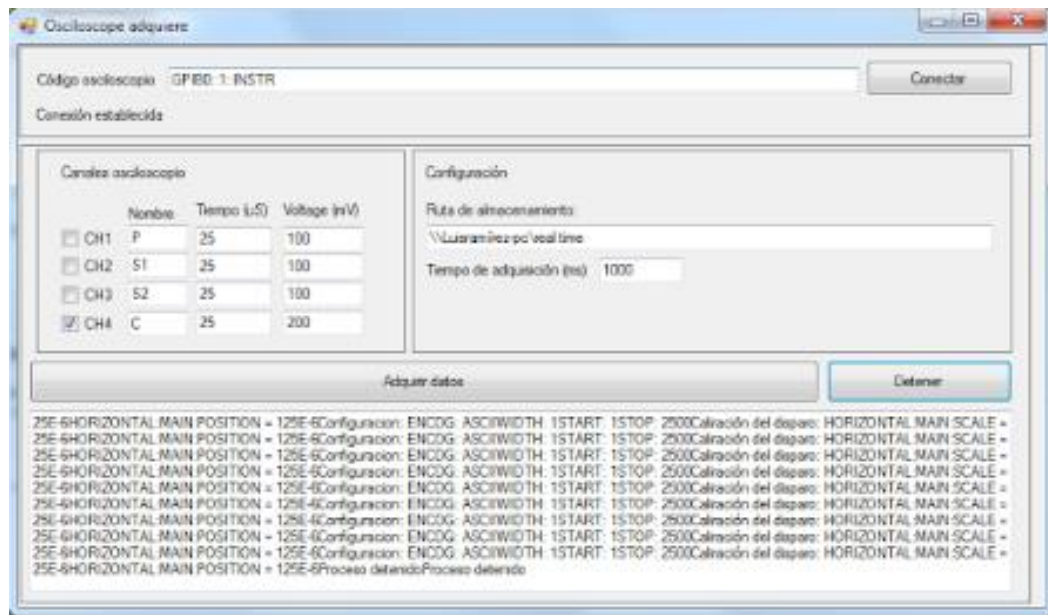
3.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Para realizar la adquisición de las señales por segundo, se programó una rutina capaz de extraer la señal acústica del cristal receptor, proveniente desde el osciloscopio. Esta rutina además permite configurar el equipo para adquisición de

señales con diferentes parámetros, como se observa en la figura 18. El software de adquisición de datos es un programa desarrollado en C# encargado de configurar el osciloscopio y además de adquirir en tiempo real los datos obtenidos. Para el desarrollo de esta rutina se hace necesario conocer los drivers o controladores de cada uno de los instrumentos a utilizar y además enlazar estos controladores a la rutina generada.

Librerías IVI Shared: son un Paquete de librerías para Microsoft Visual C#, desarrollado por la Fundación IVI, creado con el fin de combinar el uso entre los controladores de hardware y software. El osciloscopio visualiza los datos obtenidos una vez se envía el pulso y ésta es adquirida por el cristal receptor. El software de adquisición utiliza las librerías IVI Shared Component, para el control y la adquisición de datos del osciloscopio. El formato establecido por la IEEE para el control del osciloscopio es formatted IO488 y el código del instrumento es: "GPIB0::1::INSTR".

Figura 18. Software para la adquisición automática de señales del osciloscopio.



El programa desarrollado para la adquisición de señales, le permite al usuario controlar el canal del osciloscopio desde donde se encuentra adquiriendo la señal del cristal receptor, y además puede configurar el tiempo y el voltaje que va a tener la señal que se desea adquirir. Finalmente, el programa desarrollado podrá configurar la velocidad a la que podrá adquirir señales.

4. DISEÑO DEL ENSAYO

El diseño del modelo experimental tiene como finalidad establecer los parámetros que se deben tener en cuenta en el momento de realizar el experimento.

4.1. PRUEBAS PRELIMINARES

Antes de realizar el diseño del experimento, se realizarán pruebas preliminares para establecer el correcto funcionamiento de los equipos en condiciones estáticas (sin movimiento de fluidos). Adicionalmente, con esta prueba se puede establecer cuál es la mejor configuración para la ubicación de los sensores ultrasónicos.

4.1.1. Pruebas estáticas

La prueba de configuración de los cristales tiene como finalidad determinar una ubicación adecuada para los sensores sobre el tubo y además, analizar el comportamiento de las señales que se emiten y reciben por los cristales. La primera configuración de cristales se realiza colocando un cristal (R1) a 10 mm de distancia del cristal emisor (E) y otro cristal (R2) frente al emisor (E) tal como se muestra en la figura 19.

Se realizaron pruebas de propagación de la señal acústico a través de 3 diferentes medios: agua, lodo y aire, los cuales se encontraban en reposo (ver Figura 21). Para todos los experimentos realizados, se adquirieron señales en los receptores con un tamaño de muestras $N=2500$. Este experimento se realizó para las configuraciones de sensores mostradas en la figura 19. Una fotografía del ensayo real del tubo de PVC, que incluye los cristales adheridos utilizando epóxico elástico y cinta conductora, se muestra en la figura 19.

Figura 19. Configuración y alineación de los transductores. A.) Vista lateral del tubo. B.) Vista de planta del tubo.

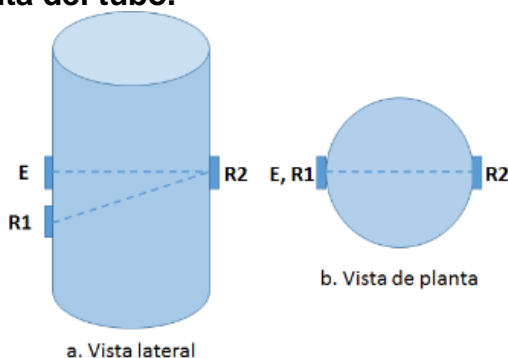
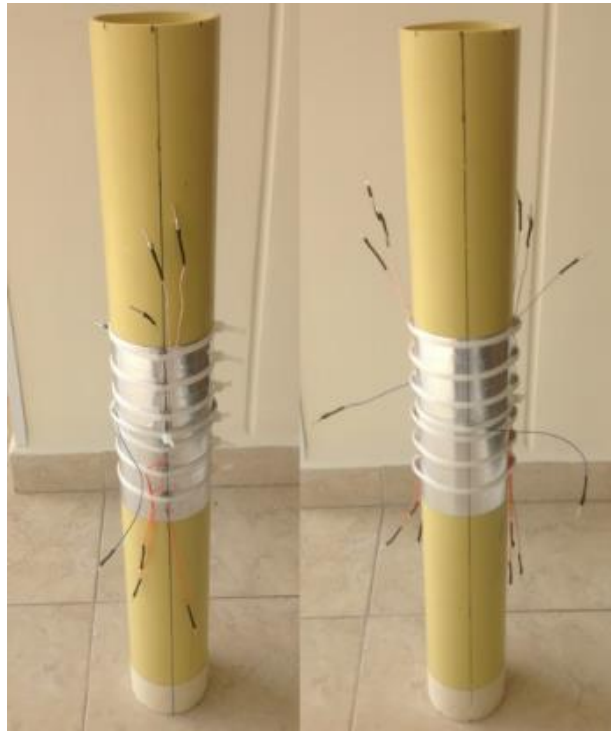


Figura 20. Montaje experimental de la tubería con los sensores (cristales longitudinales y transversales)



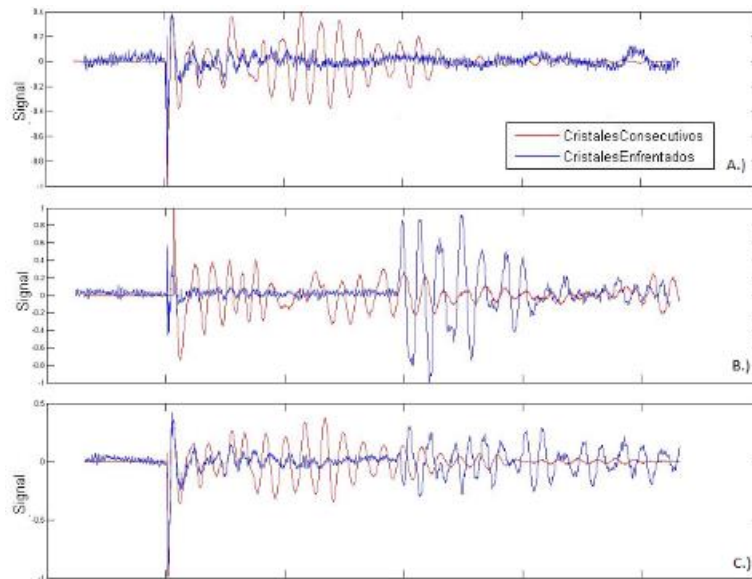
Como resultado de estas pruebas estáticas se obtuvieron las señales que se observan en la figura 21.

Caso 1 – Aire en el tubo: En la figura 21A, se observa la señales obtenidas en el cristal consecutivo (en rojo) y el cristal enfrentado (en azul) cuando el tubo se encuentra sin ningún tipo de fluido o sólido, es decir totalmente vacío. Se puede observar que entre los cristales enfrentados no hay ningún tipo de señal ya que ésta no tiene un medio por el cual viajar. Para el caso de los cristales consecutivos la señal viaja a través del espesor de la tubería.

Caso 2 – Agua en el tubo: En la figura 21B, se colocan 1000 ml de agua dentro del tubo, los cristales que se encuentran enfrentados muestran una señal clara. De igual forma para los cristales consecutivos se observa la señal que viaja a través del espesor del tubo (primer arribo), y además se detecta una segunda señal más adelante en tiempo (segundo arribo), la cual se debe a la señal que viaja por el agua, rebota y regresa al receptor.

Caso 3 – Lodo en el tubo: Para el caso de la figura 21C, se utilizó 500 ml de lodo de perforación (13 lb/barril de bentonita + 3 lb / barril de PAC (L) + 3 lb / barril de PAC (R)). Se puede apreciar un resultado similar al que ocurre cuando el tubo se encuentra lleno de agua.

Figura 21. Señales obtenidas de las pruebas preliminares. A.) Tubo vacío. B.) Agua dentro del tubo. C.) Lodo dentro del tubo. D.) Lodo y rocas en el tubo.



Los fenómenos acústicos que se describen para los casos 1 al 3, se exponen de forma detallada en la figura 22. Para el primer caso, cuando la señal acústica cambia de un medio 1 a un medio 2, y su impedancia acústica es muy alta, entonces la señal se refleja completamente y no viaja a través del medio 2. Para los casos 2 y 3 se observa que el medio 1 (PVC) y el medio 2 (agua o lodo) tienen valores de densidad y la velocidad de propagación similares, permitiendo que gran cantidad de la energía de la onda acústica se refracte y sólo un poco de se refleje.

Figura 22. Izquierda: Reflexión de la señal generada por la señal acústica debido al drástico cambio en entre los dos medios. Centro y derecha: Refracciones de la señal en los diferentes medios con arribo en los diferentes receptores (R1 y R2).

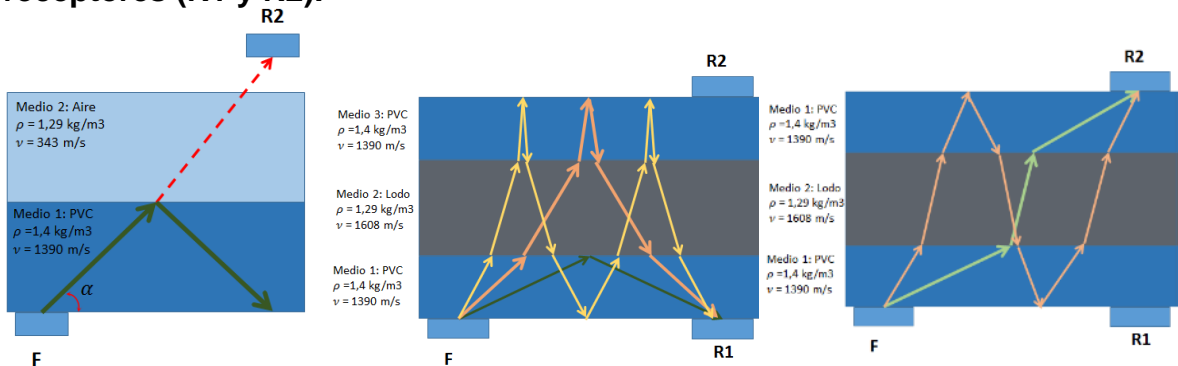


Tabla 3. Observaciones de las pruebas preliminares

RESUMEN DE PRUEBA PRELIMINAR ESTÁTICAS			
DATOS		ENFRENTADOS	CONSECUTIVOS
PRUEBA 1 Aire	SEÑAL	No se detecta	Detectada
	TIEMPO DE ARRIBO	N/A	No se puede determinar
PRUEBA 2 Agua	SEÑAL	Detectada	Estimado
	TIEMPO DE ARRIBO	Detectada	No se puede determinar
PRUEBA 3 Lodo	SEÑAL	Detectada	Estimado
	TIEMPO DE ARRIBO	Detectada	No se puede determinar

De la prueba preliminar se puede observar que la señal viaja a través del PVC únicamente cuando los cristales se encuentra configurados consecutivamente, y además están cerca el uno del otro. Cuando los cristales se ubican enfrentados, la señal acústica no es capaz de atravesar el medio (vacío) y llega totalmente atenuada al cristal receptor (no se detecta presión). Por esta razón se requiere de un medio que facilite el transporte de la señal, de un punto al otro, como lo sería el agua o el lodo.

4.2. MODELO EXPERIMENTAL

4.2.1. Matriz del modelo experimental

Para realizar el modelo experimental se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cantidad de Lodo a preparar
- Cantidad de roca necesaria
- Tamaño y concentración de roca

Dados los anteriores parámetros se propone la siguiente tabla que relaciona la cantidad de ensayos a realizar teniendo en cuenta el tamaño de la roca (λ) y la concentración de roca en el fluido C_p .

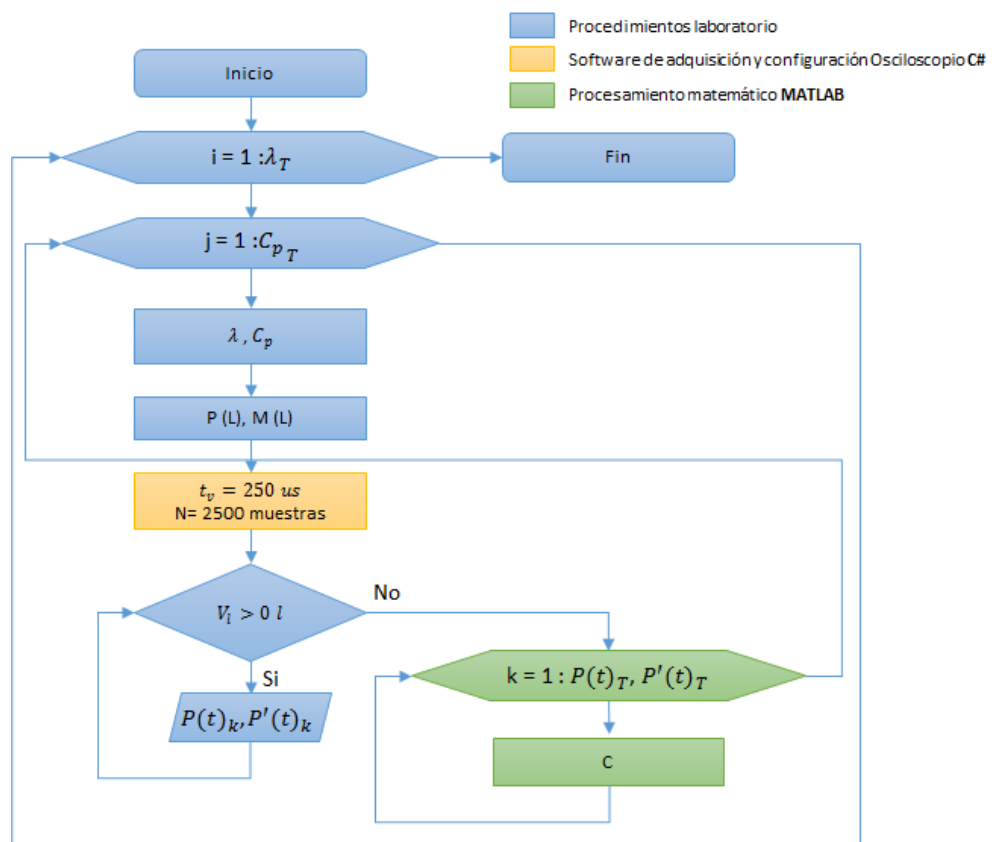
La metodología de investigación consiste en un proceso que inicia seleccionando un tamaño de cavings (bucle 1), luego se selecciona una concentración (bucle 2) y con esta información se prepara la mezcla lodo y roca. La mezcla contine una preparación del lodo ($P(L)$), que se encuentra bajo monitoreo ($M(L)$) para preservar las características previamente definidas. Utilizando el software de adquisición, establecemos y configuramos el osciloscopio de tal forma que adquiere las señales de los cristales receptores en una ventana de tiempo de $t_v = 250 \mu s$, y con un número máximo de muestras $N = 2500$.

Tabla 4. Relación de ensayos

		TAMAÑO DE LA ROCA λ (mm)	
		PEQUEÑO 2-10	GRANDE 10-20
CONCENTRACIÓN DE ROCA	BAJA	0.3%	0.3%
	MEDIA	0.5%	0.5%
	ALTA	1%	1%
	MUY ALTA	3%	3%

Dada la lista de ensayos propuesta en la Tabla 4, se puede establecer la metodología de investigación. Esta metodología se presenta en la figura 23.

Figura 23. Metodología de investigación



Con la verificación de la correcta configuración de los equipos y el material, se coloca la mezcla en el tanque superior y se abre la válvula 1 con el fin de iniciar el

movimiento del sistema; el lodo pasará a través del tubo y llegará al tanque inferior. El sistema de adquisición realizará el almacenamiento automático de las señales consecutivas y enfrentadas, y este proceso finalizará hasta que el tanque superior este totalmente vacío ($V_l = 0$ litros).

Cuando las señales han sido adquiridas en los cristales receptores ($P(t)$ y $P'(t)$), un programa desarrollado en matlab (C), se encarga de realizar las operaciones correspondientes para generar un estimado del flujo volumétrico de roca.

5. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos en la estimación de flujo volumétrico de 3 diferentes casos: 1) flujo volumétrico de sólo agua, 2) flujo volumétrico de sólo lodo y 3) flujo volumétrico de la mezcla lodo y roca (usando el modelo experimental de concentraciones definidas en la sección anterior).

5.1. FLUJO VOLUMÉTRICO DE SÓLO AGUA

Para poder validar la velocidad promedio que se estimará usando el sistema acústico, se calcula la velocidad promedio con la que el agua atraviesa el tubo de la siguiente forma: se abre la válvula inferior a $\frac{1}{4}$ de su capacidad total, y se deja salir agua por 30 segundos (usando un cronómetro).

Al final se miden la cantidad de litros que salieron en ese tiempo específico. Con estas medidas se obtiene un flujo volumétrico o caudal de agua Q en (m^3/s), como se observa en la Tabla 5. Adicionalmente, dado que conocemos el área de la sección transversal del tubo, se puede determinar la velocidad promedio con la que el agua atraviesa la sección transversal del tubo en (m/s).

Tabla 5. Caso I. Cálculo de la velocidad del Agua.

Datos adquiridos			Datos calculados	
# PRUEBA	VOLUMEN (m^3)	TIEMPO (s)	CAUDAL(m^3/s)	VELOCIDAD (m/s)
1	0.01646	29.73	0.00055331	2.405
2	0.01643	29.76	0.00055208	2.400
3	0.01655	29.43	0.00056235	2.445

Se puede afirmar que el agua atraviesa la sección transversal del tubo a una velocidad promedio de 2.417 m/s. Este resultado de velocidad promedio nos indica que el sistema tendría un flujo de fluido tipo laminar. Experimentalmente el caudal promedio se calcula midiendo la cantidad de volumen que sale en un determinado tiempo.

Cabe resaltar, que la velocidad obtenida en el actual experimento, sólo equivale a la velocidad promedio del sistema, ya que no se puede obtener un valor de velocidad instantáneo con este tipo de experimento.

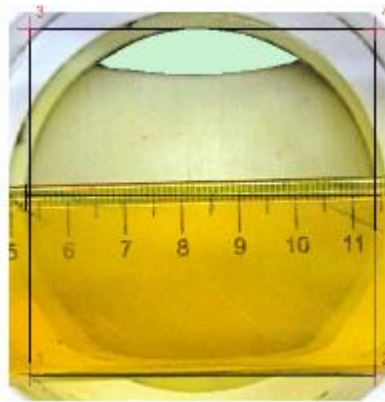
Adicionalmente, para determinar la velocidad promedio a partir del flujo volumétrico no se utiliza el área total de la sección trasversal del tubo, sino el área de la sección

transversal de la válvula, debido a que la válvula en la parte inferior no se abre totalmente, sino a $\frac{1}{4}$ de apertura de la válvula.

Para calcular el área exacta de apertura de la válvula, fue necesario utilizar un programa llamado *ARCGIS*, que nos permite determinar el área de una zona específica, estableciendo como parámetro de referencia un sistema de coordenadas y un parámetro de base para las coordenadas establecidas (una regla de medición - ver figura 24).

Usando este software, se establece el área para la válvula abierta a $\frac{1}{4}$ de su capacidad total en 0.00023m^2 .

Figura 24. Foto de la válvula del experimento, en el programa Arcgis. La zona celeste equivale a la apertura de la válvula a $\frac{1}{4}$.



5.1.1 Flujo volumétrico de sólo agua usando tiempos de arribo de la señal acústica

Para el experimento del cálculo del tiempo de arribo se utiliza los datos adquiridos entre dos cristales que se encuentran enfrentados.

A las señales obtenidas se le calcula su transformada wavelet con el fin de establecer los puntos importantes donde hay una amplitud alta en la transformación, los cuales corresponden al tiempo de arribo (ver figuras 25 y 26).

Figura 25. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el agua en movimiento. Señal que viaja del punto A hacia B: $T_{ab}=5.75e-05$ s.

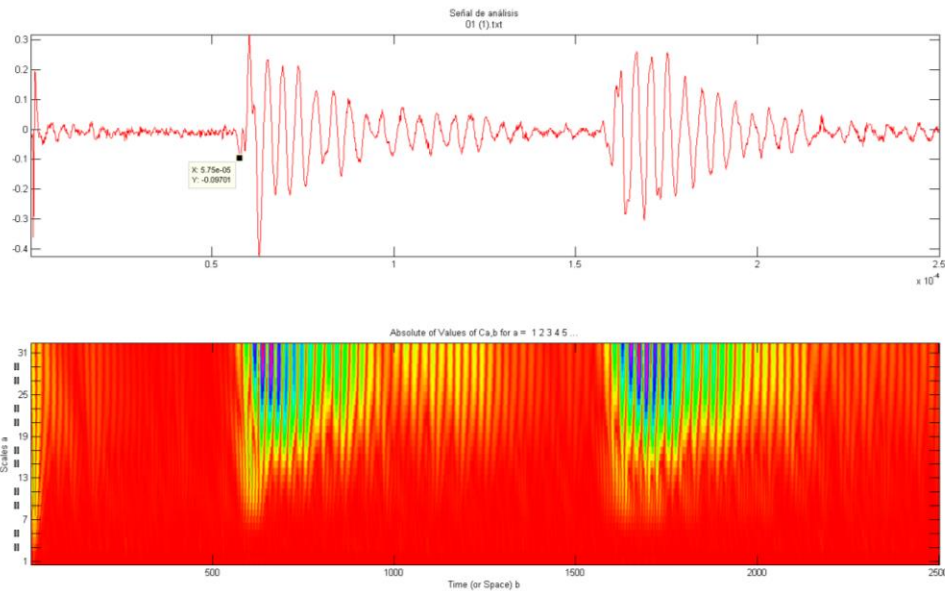
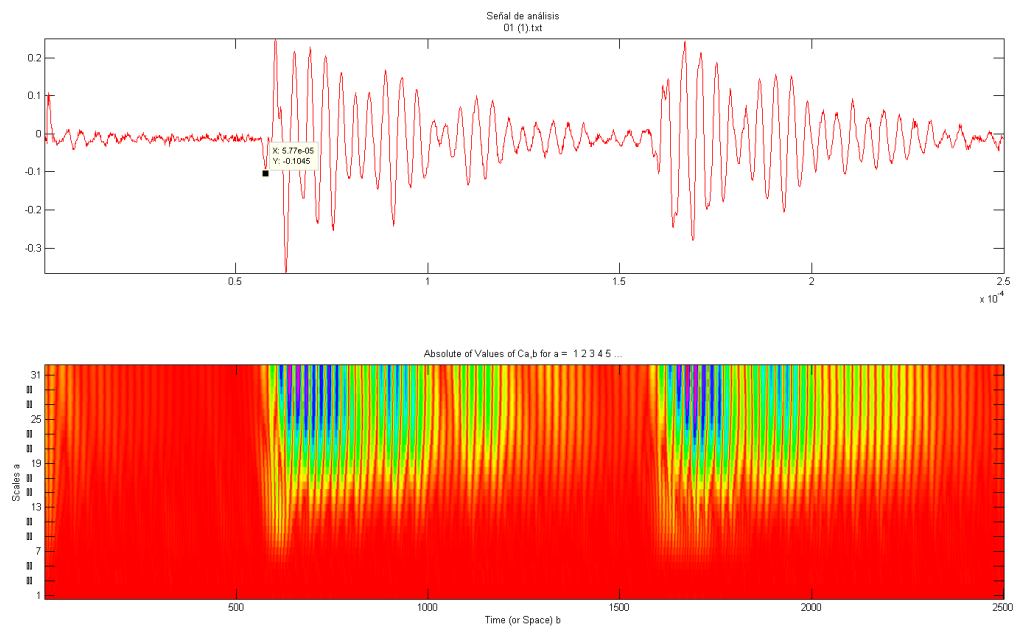


Figura 26. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con agua en movimiento. Señal que viaja desde el punto B hacia A: $T_{ba} = 5.77e-05$ s.



Es importante tener en cuenta que el primer arribo de la señal acústica corresponde a la primera señal que se observa, ya que en este caso los cristales se encuentran enfrentados y la señal no puede viajar a través del tubo.

Se repitió el procedimiento para las otras 10 señales que fueron adquiridas en cada viaje (5 de ida y 5 de regreso y se tabularon los siguientes datos:

Tabla 6. Cálculo de la velocidad del agua basado en el tiempo de arribo

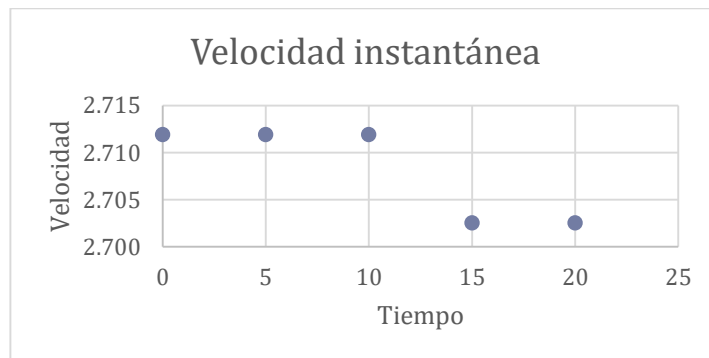
TIEMPO DE VIAJE				
Dato	t (s)	tab (s)	tba (s)	Vel. Instantánea (m/s)
1	0	5.75E-05	5.77E-05	2.712
2	5	5.75E-05	5.77E-05	2.712
3	10	5.75E-05	5.77E-05	2.712
4	15	5.76E-05	5.78E-05	2.703
5	20	5.76E-05	5.78E-05	2.703
Promedio		5.754E-05	5.774E-05	2.708
Desviación		5.477E-08	5.477E-08	5.477E-08

Utilizando la ecuación 1 se puede calcular la velocidad del fluido basándonos en los tiempos de arribo de la señal de ida y la señal de regreso. La velocidad obtenida en el experimento es en promedio 2.708 m/s.

Se puede observar que el valor teórico de la velocidad promedio del fluido calculado anteriormente y registrado en la Tabla 5, es menor que el valor calculado usando esta técnica acústica de tiempos de arribo. Se puede establecer que el valor teórico es 88.63%, el valor de la velocidad del fluido calculado con este método acústico.

De igual forma se pudo verificar que a medida que el tanque se va desocupando, la velocidad instantánea del fluido disminuye. Esta tendencia se puede observar en el experimento, tal como se observa en la figura 27.

Figura 27. Velocidad instantánea del agua a medida que se desplaza por el tubo. Velocidad instantánea medida usando el tiempo de arribo de las señales acústicas.

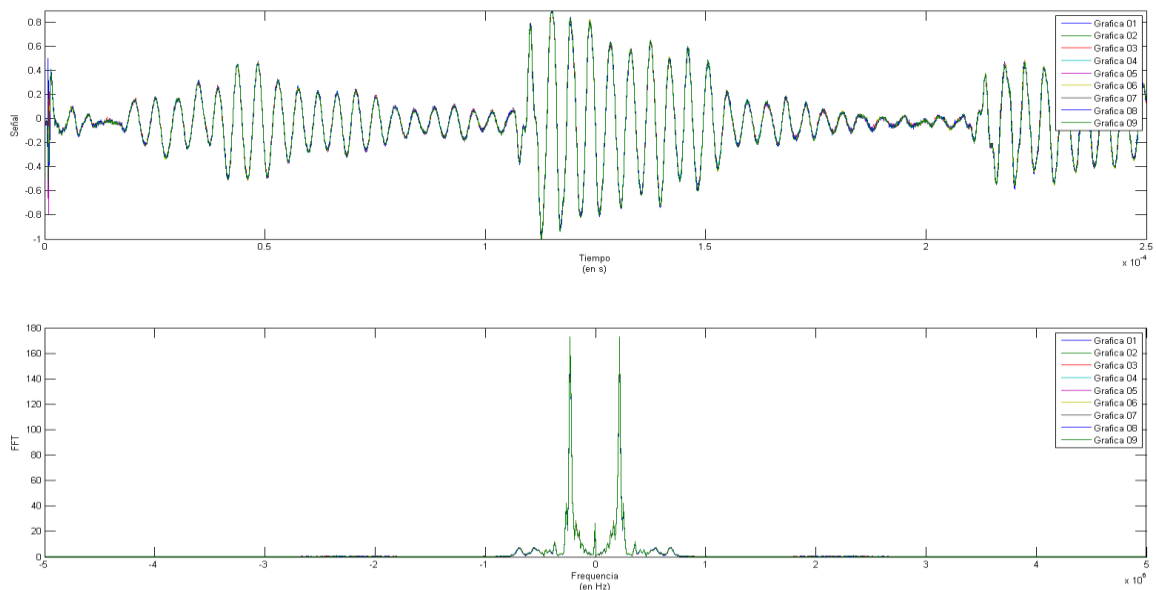


5.1.2. Flujo volumétrico de sólo agua usando efecto Doppler

Para calcular la velocidad del fluido usando efecto Doppler, se adquieren señales acústicas en los cristales (transductores) ubicados en forma consecutiva.

Primero se calcula la frecuencia del cristal emisor. Este proceso se puede realizar cuando el agua se encuentra totalmente quieta. La señales recibidas cuando el fluido se encuentra estático y su correspondiente transformada de Fourier, se pueden observar en la figura 28.

Figura 28. Arriba: señales acústicas del transductor emisor. Abajo: Transformada de Fourier de las señales adquiridas. Frecuencia = 2.26×10^5 Hz.



Se puede hacer un acercamiento a la zona de interés en la transformada de Fourier, el cual corresponde al punto de mayor energía. De esta forma se puede establecer con mayor exactitud el valor de la frecuencia para las señales utilizadas. La figura 29 muestra la transformada de Fourier de 6 señales emitidas, en la zona de interés, y la Tabla 7 presenta el valor promedio de la frecuencia del emisor, junto con su desviación estándar.

El mismo procedimiento se realiza para calcular la frecuencia del receptor. Para 5 señales recibidas en el cristal consecutivo se obtienen las frecuencias presentadas en la Tabla 8. Usando la ecuación 5 se obtienen las velocidades instantáneas del agua en movimiento. De igual forma, estas velocidades se encuentran registradas en la Tabla 8.

Figura 29. Acercamiento de la transformada de Fourier de 6 señales acústicas emitidas.

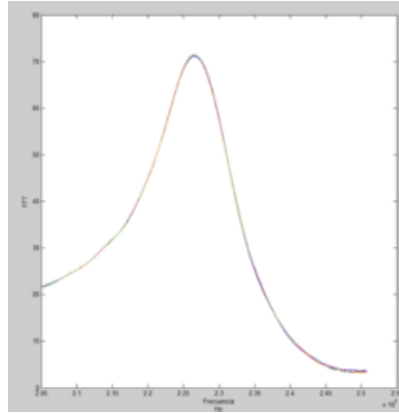


Tabla 7. Frecuencia obtenida con el emisor

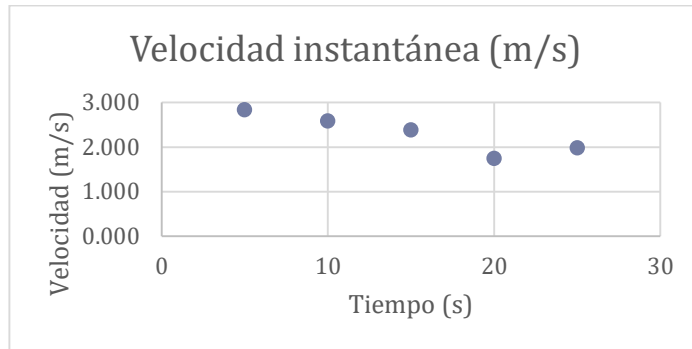
FRECUENCIA DEL EMISOR	
Media (Hz)	Desviación (Hz)
216130.534	68.604

Tabla 8. Frecuencia obtenida con los receptores y con el agua en movimiento

FRECUENCIA DEL RECEPTOR CON AGUA EN MOVIMIENTO		
Prueba	Frecuencia (Hz)	Vel. Instantánea (m/s)
1	215692.653	2.836
2	215731.899	2.582
3	215762.179	2.386
4	215860.781	1.747
5	215824.553	1.982
Promedio	215774.414	2.307

Comparando el resultado de velocidad promedio obtenido, con el resultado de velocidad promedio teórico, se encuentra que la técnica acústica de efecto doppler tiene un porcentaje de aproximación de 95.024% al valor teórico. De igual forma, se verifica que la velocidad instantánea disminuye a medida que el volumen del tanque superior disminuye (ver figura 30).

Figura 30. Velocidad instantánea del agua medida con el efecto doppler.



5.2. FLUJO VOLUMÉTRICO DE SÓLO LODO

Se repite el mismo procedimiento que se hizo con el agua, pero ahora para calcular la velocidad del lodo. Después de realizar 3 pruebas experimentales con la válvula abierta a $\frac{1}{4}$ de su capacidad, se obtuvo el valor teórico de velocidad y flujo volumétrico que se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Experimento II. Cálculos de velocidad y flujo volumétrico o caudal del lodo.

# PRUEBA	Datos adquiridos		Datos calculados	
	VOLUMEN (m^3)	TIEMPO (s)	CAUDAL (m^3/s)	VELOCIDAD (m/s)
1	0.01275	29.19	0.000437	1.8991
2	0.01578	29.30	0.000539	2.3416
3	0.01580	28.86	0.000547	2.3803

Para el caso del lodo, se puede concluir que la velocidad a la que éste se desplaza por la tubería, en promedio es igual a 2.207 m/s. Al igual que los resultados obtenidos con el agua, el caudal debe mantenerse en flujo laminar para lograr mantener los datos anteriormente señalados.

5.2.1 Flujo volumétrico de sólo lodo usando tiempos de arribo de la señal acústica

Repetimos el procedimiento para el cálculo del tiempo de arribo de las diferentes señales obtenidas con el lodo en movimiento. Las velocidades instantánea y promedio obtenidas con el método del tiempo de arribo de la señal acústica se observan en la Tabla 10.

Figura 31. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el lodo en movimiento. Señal desde A hacia B $t_{ab}=5.79e-05$ s.

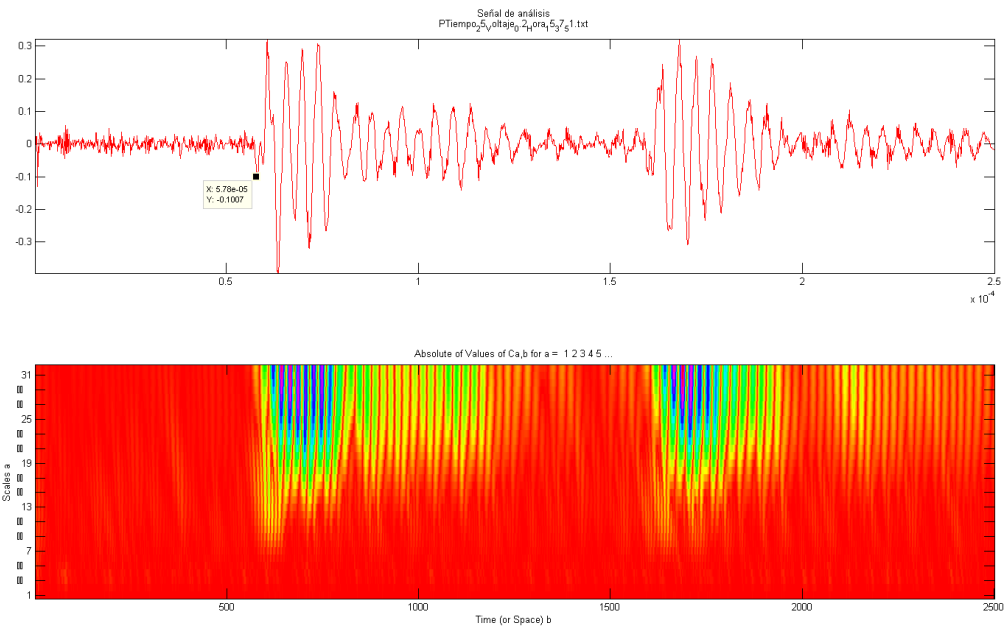


Figura 32. Cálculo del tiempo de arribo en una señal adquirida con el lodo en movimiento. Señal desde B hacia A. $t_{ba}=5.81e-05$ s.

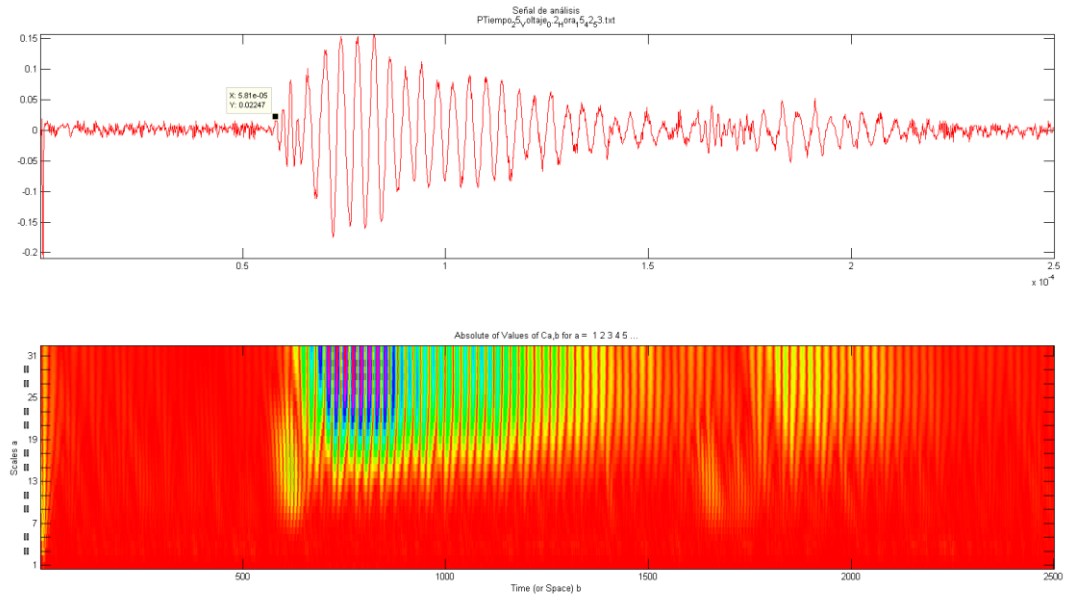


Tabla 10. Velocidad instantánea del lodo.

Dato	t(s)	tab (s)	tba (s)	Vel instantánea (m/s)
1	0	5.800E-05	5.810E-05	1.283
2	5	5.800E-05	5.810E-05	1.283
3	10	5.790E-05	5.820E-05	3.850
4	15	5.780E-05	5.810E-05	3.863
5	20	5.790E-05	5.810E-05	2.571
Promedio		5.792E-05	5.812E-05	2.569
Desviación		8.367E-08	4.472E-08	1.287

5.2.2. Flujo volumétrico de sólo lodo usando efecto Doppler

Al igual que para el experimento con agua, primero se calcula la frecuencia del cristal emisor. La figuras 33 y 34 presentan las señales de emisor adquiridas con su correspondiente transformada de Fourier y el acercamiento en la zona de interés en la transformación, respectivamente. La Tabla 11 registra el valor promedio de la frecuencia del emisor y su desviación estándar (en Hz), obtenidos para las señales emitidas. De igual forma, la Tabla 12 presenta la frecuencia de la señal medida en el receptor y el valor de velocidad instantánea y promedio del lodo calculado usando efecto Doppler.

Tabla 11. Frecuencia de la señal acústica emitida.

FRECUENCIA DEL EMISOR	
Media (Hz)	Desviación (Hz)
229128.960	51.9

Figura 33. Arriba: Señales del transductor emisor. Abajo: Transformada de Fourier de la señal original

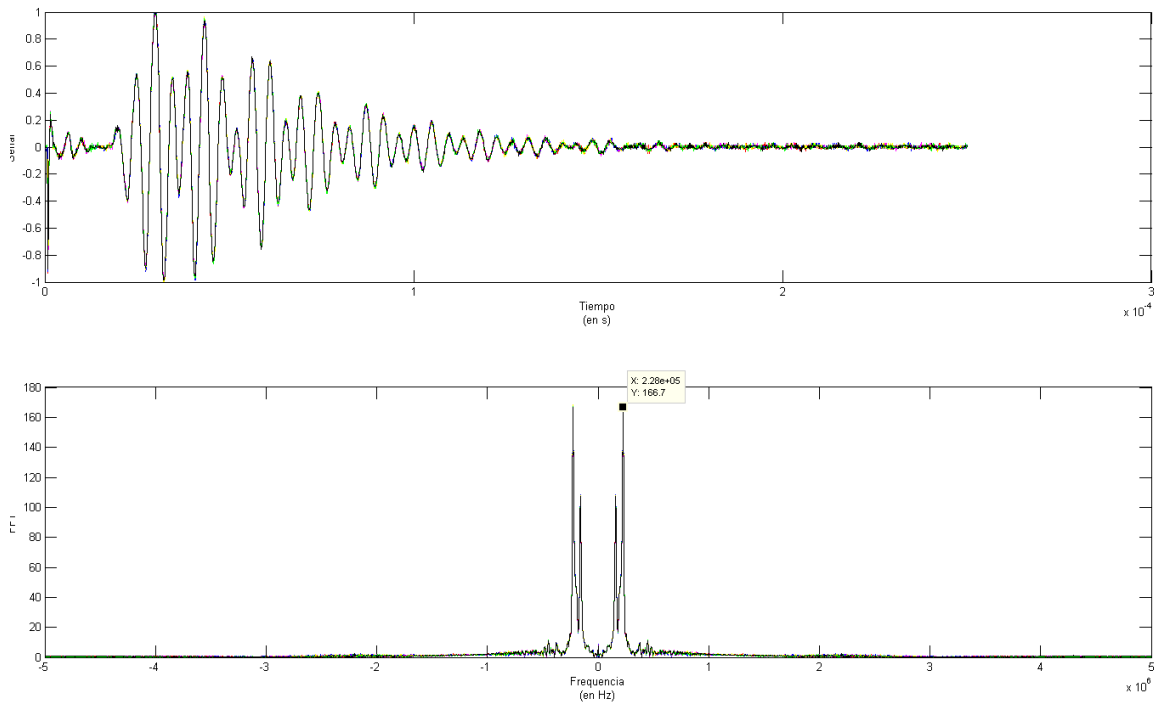


Figura 34. Acercamiento de la Transformada de Fourier en la zona de interés para las señales adquiridas.

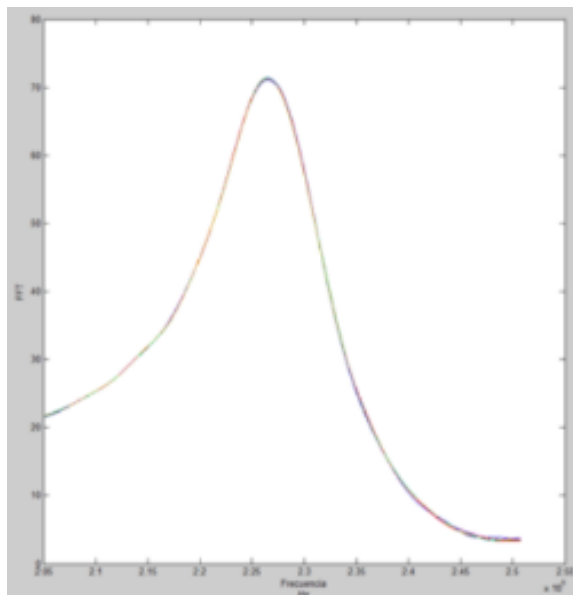
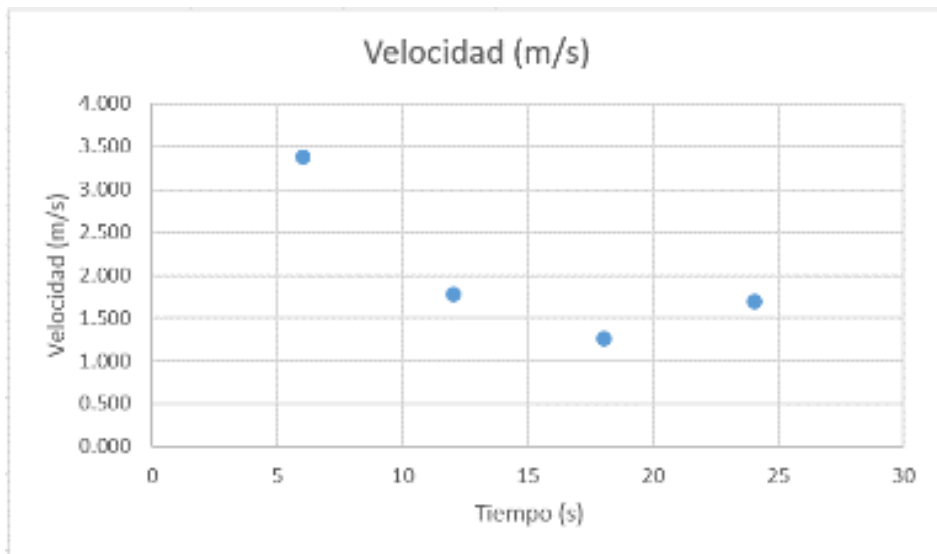


Tabla 12. Frecuencia obtenida con los receptores y con el lodo en movimiento.

FRECUENCIA DEL RECEPTOR CON LODO EN MOVIMIENTO		
Prueba	Frecuencia (Hz)	Vel. Instantánea (m/s)
1	228771.289	2.498
2	228821.204	2.149
3	228944.179	1.290
4	228880.395	1.736
Promedio	228854.267	1.9182

Al comparar el resultado obtenido de velocidad del lodo con efecto Doppler y la velocidad teórica se observa un porcentaje de aproximación entre los dos métodos es del 99.01%. De igual forma se verifica que la velocidad instantánea obtenida con los datos acústicos disminuye a medida que el tanque se desocupa (ver figura 35).

Figura 35. Velocidad instantánea del lodo medida que el tanque se desocupa, usando efecto Doppler.



5.3. FLUJO VOLUMÉTRICO DE ROCA Y LODO

El objetivo de esta prueba consiste en encontrar una relación entre la frecuencia, el tiempo de arribo y la concentración de cavings que viaja a través del tubo en cada prueba.

Para realizar las pruebas se mantienen los veinte litros de lodo de los experimentos anteriores. Adicionalmente se calculan las cantidades necesarias de roca en gramos, de tal forma que se obtienen las concentraciones de roca en lodo

planteadas en la tabla 4 del modelo experimental. La cantidad de gramos de roca requeridos se registran en la tabla 8.

Tabla 6. Relación de diferentes concentraciones de roca y la masa usados en cada experimento.

RELACIÓN VOLUMEN - MASA				
% DE VOLUMEN	Volumen (l)	Volumen (m3)	Masa (kg)	Masa (g)
0.30%	0.06	0.00006	0.08400	84.00
0.50%	0.10	0.00010	0.14000	140.00
1.00%	0.20	0.00020	0.28000	280.00
3.00%	0.60	0.00060	0.84000	840.00

Para realizar el experimento de manera precisa y confirmar que las señales que adquiere el sistema observan la roca en movimiento a través del tubo, se establece el siguiente procedimiento en el experimento:

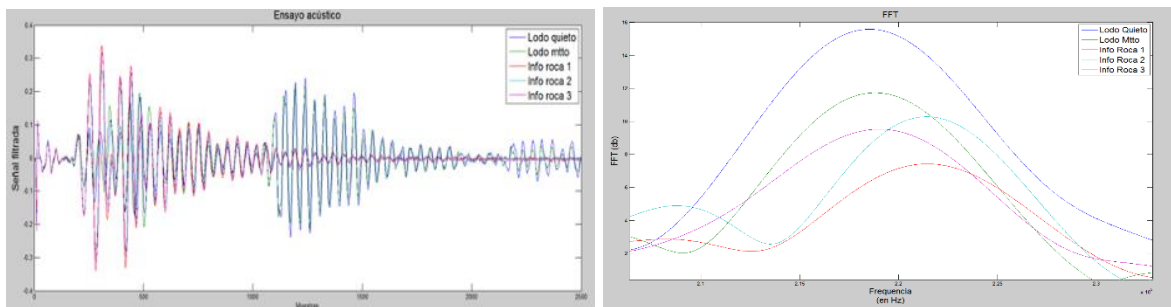
- A. Instante $t=0$: El sistema con el lodo se mantiene estático y se inicia la adquisición (válvula superior abierta, válvula inferior cerrada, lodo en la tubería y tanque superior estático). El sistema de adquisición en ese instante almacena la primera señal.
- B. Instante $t=1$: Se procede a abrir la válvula en la parte inferior del tubo (se mantiene la válvula abierta a $\frac{1}{4}$ de su capacidad total). De esta forma el lodo inicia su movimiento manteniendo el flujo laminar; a su vez se procede a introducir los derrumbes en el tanque superior, dirigidos inmediatamente al tubo por medio de un cono hueco (ver figura 36). En este instante el sistema adquiere la segunda señal del osciloscopio.
- C. Instante $t=2, 3, \dots, n$: Los cavings se mezclan con el lodo y se desplazan a través del tubo pasando por el sensor. El tubo a su vez va desocupando todo el contenido en el tanque de recepción. El sistema de adquisición se encuentra almacenando las señales reflejadas por la presencia de roca en la mezcla.

Figura 36. Cono para dirigir la ruta de los cavings hacia el tubo.



Realizando el procedimiento mencionado anteriormente se pueden observar las señales que incluye información referente a la concentración de lodo y rocas, cuando éstas pasaron por el sistema de adquisición.

Figura 37. Izquierda: señales obtenidas en los 3 instantes de tiempo. Derecha: Transformadas de Fourier para cada señal adquirida.



El sistema muestra una diferencia, tanto en la forma de la señal como en las frecuencias de las mismas, a medida que se aumenta la concentración de rocas. De esta forma es posible generar patrones para su diferenciación y caracterización según el tipo de señal obtenida:

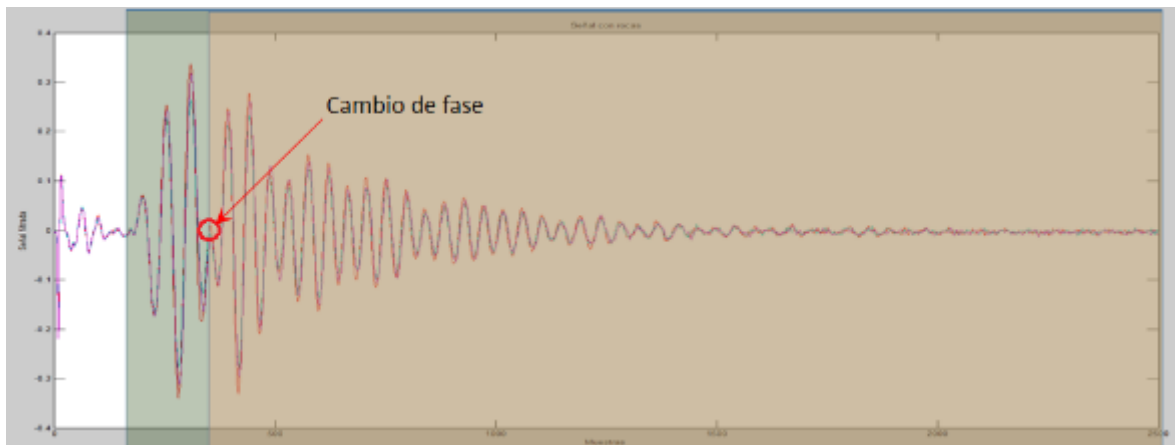
- A. Instante $t=0$: La señal viaja a través de dos materiales diferentes, el lodo y el PVC. El primer arribo de la señal como lo hemos descrito anteriormente corresponde al arribo de la señal por el espesor de la tubería; pero adicionalmente podemos confirmar dos arribos posteriores.

- B. Instante $t=1$: La señal con el lodo en movimiento presenta una frecuencia diferente a aquella obtenida cuando el lodo está quieto. Adicionalmente, la amplitud de la señal se atenúa en comparación con la señal en lodo quieto.
- C. Instantes $t=2,3,\dots,n$: Las señales obtenidas a partir de este momento *pueden* contener información de la roca, y es importante asegurar que la señal incluye la presencia de roca en el tubo para incluirla en los resultados.

La primera característica que tienen estas señales es que los arribos 2 y 3 tienen una amplitud mucho menor, ya que la impedancia entre los medios es bastante alta (ver figura 22, relación de los medios: PVC, lodo y roca). La señal acústica que detecta el paso de la roca es aquella que se observa en el primer arribo, la cual contiene además aquella señal que viaja a través del tubo.

En esta mezcla de las dos señales (tubo y roca) se puede observar el arribo de aquella que observa la roca en donde ocurre un cambio de fase. Este fenómeno se ilustra en la figura 38.

Figura 38. Señal acústica obtenida cuando se usa la mezcla lodo y roca. Visualización del cambio de fase.



Una vez establecidas las diferencias entre las diferentes señales adquiridas, se procede a encontrar la frecuencia de las señales que detectaron el paso de roca por el tubo. En la Tabla 9, columna 5, se registra la diferencia promedio entre la frecuencia del receptor y del emisor para diferentes concentraciones y tamaños de roca. De igual forma se registra la desviación estándar en frecuencia para los diferentes tipos de roca.

Tabla 7. Relación entre la frecuencia, la concentración y el tamaño de la roca.

CAMBIO EN LA FRECUENCIA OBSERVADA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES Y TAMAÑO DE ROCA					
Concentración (%)	Masa (g)	Tamaño mínimo (mm)	Tamaño máximo (mm)	Delta de frecuencia - Media (Hz)	Desviación (Hz)
0.1	84	1	10	1335.576	12.638
0.3	140	1	10	1506.240	7.799
0.5	280	1	10	1702.569	202.574
3	840	1	10	1854.244	25.940
0.1	84	10	20	1832.145	63.842
0.3	140	10	20	2098.155	33.155
5	280	10	20	3339.065	33.408
3	840	10	20	4142.833	262.333

Figura 39. Izquierda: Cavings grandes (10-20mm). Derecha: Cavings pequeños (1-10mm)



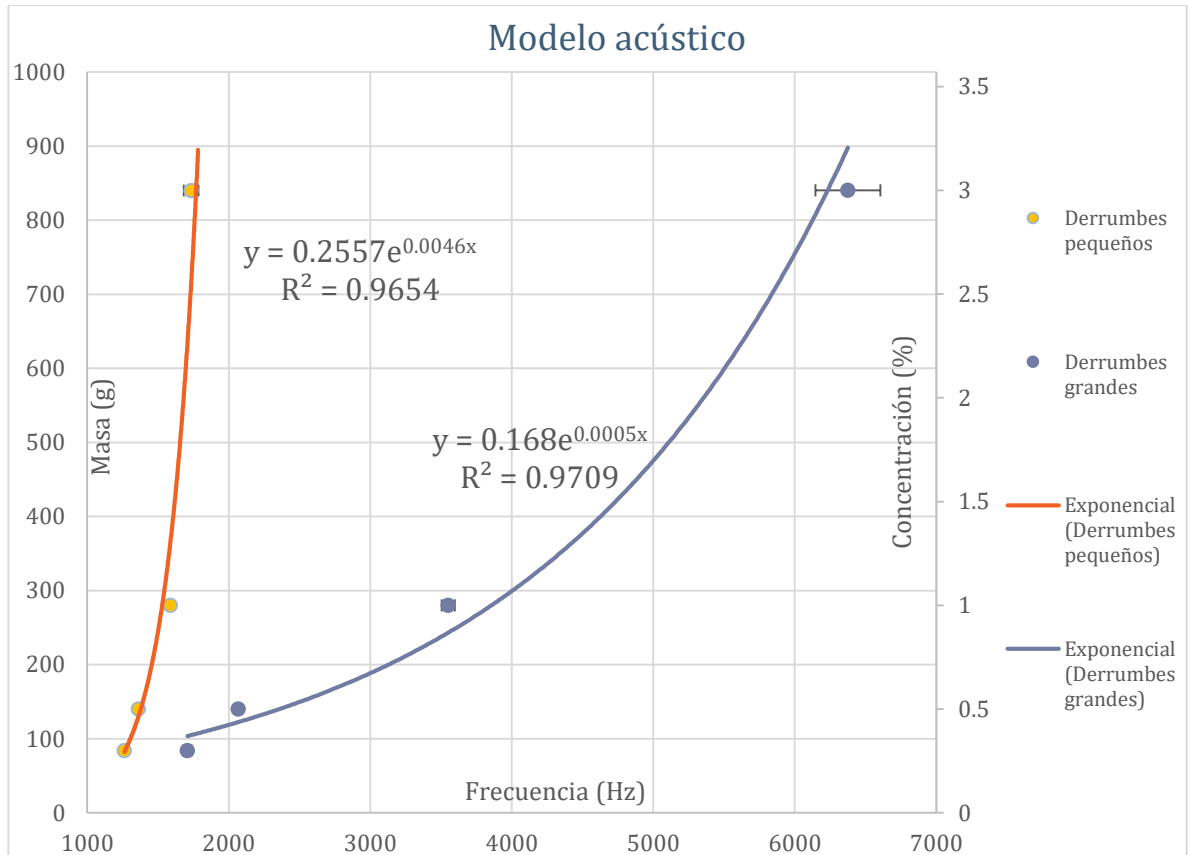
Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas.

En la figura 39 se detallan dos fotografías de una muestra de la población total para derrumbes de tamaño pequeño y grande los cuales fueron utilizados para los ensayos con roca.

Con los valores de frecuencia hallados, se puede generar un modelo matemático que permita determinar la relación que existe entre la frecuencia y la concentración de cavings para los diferentes tamaños señalados. Los modelos matemáticos que mejor se ajustan a los datos observados para derrumbes pequeños y grandes, son modelos logarítmicos. El modelo hallado para el caso de cavings pequeños tiene un

coeficiente de correlación de 0.961 con los datos observados, mientras que para el caso de cavings pequeños el modelo hallado y los datos observados tienen un coeficiente de correlación de 0.958. Estos resultados indican que la regresión logarítmica utilizada es adecuada para representar el comportamiento del cambio en frecuencia en función de la concentración de roca.

Figura 40. Modelo acústico para la estimación de cavings/cortes a diferentes tamaños



5.3.1. Cálculo del flujo volumétrico

Una vez obtenida la frecuencia, podemos establecer la velocidad a la que se están moviendo las partes de roca en un tubo. La ecuación 5 nos permite realizar estos cálculos. Para calcular el flujo volumétrico sólo basta con utilizar la ecuación 2 la cual consiste en multiplicar la velocidad con el área transversal del tubo. En este punto es importante aclarar que el área transversal no es la total (230 mm²) ya que la roca no está en la totalidad del área de la sección transversal del tubo. Se puede determinar un valor aproximado de esta área, conociendo el porcentaje de

concentración establecido para cada una de las cantidades de roca utilizadas. Los resultados del flujo se muestran en la tabla

Tabla 8. Relación de la masa/concentración/velocidad y flujo volumétrico

Parámetro	100 % pequeños				100% Grandes			
Masa (g)	84	140	280	840	84	140	280	840
Concentración (%)	0.3	0.5	1	3	0.3	0.5	1	3
Vel. (m/s)	4.702 08	5.167 61	6.294 71	8.046 21	6.157 72	7.671 64	13.845 09	29.398 87
Flujo Vol. (m ³ /s)	0.000 32	0.000 59	0.001 45	0.005 55	0.000 42	0.000 88	0.0031 8	0.0202 9

5.3.2. Validación del modelo matemático para determinar flujo volumétrico de roca

Después de generar el modelo de cambio en la frecuencia del receptor en función de la cantidad de gramos de roca que pasa por el tubo y el tamaño de la roca, este modelo debe ser validado con un conjunto de experimentos de validación. Para esto se realizaron nuevos experimentos, utilizando diferentes concentraciones de roca y con rocas de diferentes tamaños con el fin que el sistema, no sólo determine las diferentes concentraciones, sino que además indique el tamaño. En la tabla 10 se muestra el resultado de los ensayos de validación para los experimentos realizados.

Tabla 9. Resultados de la validación del modelo matemático de relación entre el cambio de frecuencia observado y la concentración de roca.

DATOS INGRESADOS		VALORES ESTIMADOS		% ERROR	
Concentración (%)	Masa (g)	Concentración (%)	Masa (g)	Concentración	Masa
0.320	90.000	0.293	82.123	8.437	8.752
0.390	109.000	0.333	93.000	14.615	14.678
0.680	190.000	0.844	236.294	24.117	24.365
0.750	210.000	0.724	202.756	3.466	3.449
1.095	306.000	1.476	413.510	34.794	35.133

5.4. ELEMENTOS DE SEGURIDAD PARA REALIZAR EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS EN POZO

Debido a las condiciones de trabajo que se pueden presentar durante la perforación de un pozo, ya sea de crudo o de gas, existen diferentes riesgos y por esta razón

se deben tener en cuenta ciertas consideraciones de seguridad. Además es importante revisar cuales deben ser los equipos que trabajarán de forma más adecuada en las condiciones de un pozo. Para el estudio de seguridad se deben tener en cuenta dos normas eléctricas:

5.4.1. ANSI/IEC 60529-2004

El ANSI/IEC 60529 es un estándar internacional que describe un sistema de clasificación en grados de protección proporcionados por los equipos eléctricos en dos condiciones específicas:

- La protección de las personas al acceder a lugares potencialmente peligrosos y la penetración de cuerpos sólidos extraños en los equipos.
- La entrada de agua en el sistema.

El grado de protección frente a estas dos condiciones se designa por un código IP. El primer dígito establece el grado de protección contra el ingreso de objetos sólidos y el segundo establece el grado de protección contra el ingreso de agua. Para las condiciones de seguridad en los pozos, trabajando fuera de cabina, se ha determinado que el nivel de protección contra el polvo debe ser de 6 y contra el agua de 4. La tabla muestra una relación entre los diferentes tipos de protección dados por este protocolo.

Tabla 10. Tipos de protección en equipos eléctricos

NIVEL	SÓLIDAS	LÍQUIDAS
1	Sólidos < 50 mm	Protección contra caída vertical de agua
2	Sólidos < 12 mm	Protección contra caída de agua a 15°
3	Sólidos < 2.5 mm	Protección contra caída de agua a 60°
4	Sólidos < 1 mm	Protección contra gotas de agua en todas las direcciones
5	Protección contra el polvo a bajas cantidades	Protección contra agua a bajas presiones
6	Máxima protección contra el polvo	Protección contra agua a altas presiones
7	-	Posibilidad de sumergir el equipo a menos de 15 cm por 30 min
8	-	Posibilidad de sumergir el equipo a cualquier profundidad y presión

5.4.2. NORMA NEC O NFPA 70

La norma NFPA (National Fire Protection Association) es un estándar en Estados Unidos para la instalación segura de cableado y equipos eléctricos. Esta norma tiene en cuenta todas las consideraciones para evitar que se produzcan explosiones causados por problemas eléctricos en los equipos.

Entre las principales características que debemos tener en cuenta para el estudio de seguridad con respecto a las normas NFPA, están:

Equipos a prueba de explosión: Componentes a prueba de explosión y encapsular el cableado colocando los límites de la zona de peligro con cortafuegos para evitar que por la tubería se propague alguna condición insegura. Se protege eléctricamente la parte exterior hacia la zona de peligro con barreras *Zenner* para evitar sobre-tensiones que puedan ocasionar algún tipo de corto o sobrecalentamiento en los componentes.

Intrínsecamente seguros: Los equipos intrínsecamente seguros tienen como finalidad no manejar valores por encima de 1.2 V, 0.1 A, 25 mW, 20 μ J. Estos límites pueden generar un incidente en atmósferas explosivas. Se observa que el generador de pulsos utilizado en esta investigación no es un equipo intrínsecamente seguro, ya que este equipo envía pulsos eléctricos cuadrados de hasta 300 V.

Sin embargo este equipo puede ser reemplazado siempre que existe otro que permita generar pulsos de al menos 300 V. Además debe permitir la adquisición de la señal emitida en tiempo real, y de ser posible tenga la capacidad de adquirir por varios canales al mismo tiempo. Finalmente se da como opción adicional la posibilidad de visualizar los datos adquiridos simultáneamente al igual que lo haría un osciloscopio típico.

El equipo Tektronix presentado en la Figura 42 incluye todas las funcionalidades anteriormente mencionadas y tiene la ventaja de que permite trabajar en condiciones altamente peligrosas.

Figura 41. Equipo 4200-SCS de tektronix. Izquierda parte frontal del equipo. Derecha Parte posterior con amplificadores como accesorios



Fuente: Tektronix. <http://www.tek.com/4200-scs-parameter-analyzer>

El sistema que se observa en la Figura 42 consta de un equipo con su propio procesador y sistema operativo que es capaz de generar pulsos de alto voltaje y además permite calibrar el ancho del pulso eléctrico. Los pulsos generados por el equipo tienen un máximo de 40 V, pero permite entre sus configuraciones y accesorios, añadir amplificadores que eleven el pulso eléctrico a los 300 V requeridos. Entre sus conexiones principales incluye puertos de tipo GPIB y conexiones para la adquisición y visualización de las señales en tiempo real, pues contiene un procesador de cuatro núcleos incluido.

Adicionalmente el equipo está diseñado con protocolo IP31 (tabla) el cual es resistente al ingreso de sólidos de gran tamaño y evita el ingreso de gotas de agua provenientes de dirección vertical. Este equipo no podrá ser utilizado fuera de una cabina, pero podrá enviar la señal al *Flow line* a través de cable coaxial apantallado de tipo RG y a su vez la señal recibida regresará por un cable del mismo tipo.

5.4.3. Cable de transmisión

Es importante describir el tipo de cable que se usaría en campo debido a que éste se encargará no sólo de llevar el pulso eléctrico hasta la tubería o de traer de regreso las señales obtenidas de los diferentes receptores, sino que además estará trabajando fuera de la cabina en donde se encontrará con un ambiente de alto riesgo. Se detalla el cable coaxial tipo RG, ya que es un cable apantallado especializado en el envío de señales de video, microondas, datos digitales y para el caso de estudio, envío y recepción de señales de alta frecuencia. Por su elaboración el cable cuenta con una banda externa de PVC la cual evita que su interior quede

expuesto al ambiente y además no sea maltratado o se ponga en corto. Incluye una malla trenzada de cobre estañado y un aislamiento de polietileno los cuales evitan que se generen campos eléctricos o señales parásitas en el envío y la recepción de la señal. El conductor es de cobre sólido o cableado el cual se encargará de la transmisión de datos.

Figura 42. Cable coaxial para transmisión de datos



Fuente: <http://modul.galeon.com/aficiones1366312.html>

El voltaje máximo que resisten estos cables es de 300 V para la versión 18AWG al 24 AWG y 600 V para las versiones del 16AWG al 500 KCM. Para verificar los diferentes tipos de cableado que pueden ser utilizados en el equipo final se recomienda ver la lista de cables anexa al documento.

6. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un equipo que permite simular el proceso de transporte de cavings que se realiza en los pozos de hidrocarburo. Con el equipo construido se realizaron diferentes experimentos de laboratorio y las pruebas acústicas necesarias para determinar el flujo volumétrico de roca extraída.
- Se diseñó e implementó un software que permite la adquisición de ondas acústicas dentro del equipo experimental de forma automática. Adicionalmente, se presentaron las observaciones de seguridad que deben tener los equipos para poder operar en los pozos petroleros.
- Se logró construir un modelo que logra relacionar la frecuencia con el flujo volumétrico de cortes y derrumbes de forma exponencial a diferentes tasas de crecimiento para los diferentes tamaños y concentraciones. El método propuesto mostró ser adecuado para la pequeña concentración de rocas donde el porcentaje de error fue relativamente bajo, mientras que para altas concentraciones, el error fue significativamente alto.
- Los cristales enfrentados no muestran resultados concluyentes al enviar roca por el tubo debido a la gran cantidad de reflexiones que presenta la señal en el medio, debido a esto la mejor configuración para encontrar el flujo volumétrico debe ser con los cristales piezo-eléctricos consecutivos.
- Con respecto al sistema de adquisición se puede observar que la medida en “tiempo real” hace referencia a adquirir una señal acústica cada 5 segundos en un solo canal. Si se requiere tomar la señal enfrentada y consecutiva al mismo tiempo se requieren mínimo 4 canales, lo cual implican 20 segundos entre la primera y la última señal adquirida. Esto implica que hay información que la señal ha detectado, pero no ha sido captada por la instrumentación, lo cual implica pérdida de precisión en el dato final.
- El generador de pulsos utilizado en esta investigación no permite modificar el ancho del pulso. Esto implica que la resolución en frecuencia queda limitada por el ancho del pulso emitido, y en algunos casos podemos perder resolución importante para determinar el cambio en frecuencia entre la señal emitida y la señal recibida. Se recomienda utilizar un generador de pulsos que permita graduar el ancho del pulso emitido, así se podrá calibrar el flujo volumétrico para el caso velocidades del fluido muy bajas.

Algunas observaciones técnicas que se pueden resaltar de este trabajo de investigación son:

- A medida que aumenta la viscosidad del lodo, el segundo arribo de la señal se ve atenuado, haciendo más complejo encontrar la ventana del segundo arribo y tercer arribo. Se recomendaría utilizar un amplificador a la salida del cristal receptor, para poder determinar el momento donde se observa la llegada de la señal.
- La aplicación del PAC-R debe realizarse con suficiente cuidado y además se debe agregar al lodo de forma muy lenta ya que se forman unos grumos que son detectados por la señal de ultrasonido haciendo que la señal no se estabilice cuando el sistema se encuentra en condiciones estáticas.
- Es importante mantener totalmente sellado el lodo de perforación, colocando un plástico sobre el contenedor y además sellando con cinta cualquier espacio que lo deje a la intemperie, ya que mientras mejor sea el sello, mayor será el tiempo que conservará sus propiedades.
- Para que el sistema sea aún más preciso y eficiente, se recomienda que se instale por lo menos 3 pares de cristales (3 emisores, 3 receptores), o de ser posible 1 emisor y tres receptores, con el fin que se pueda confirmar el dato con los diferentes sensores instalados.
- En el caso que no se pueda instalar una tubería de material de PVC (por las altas temperaturas de los pozos), se recomienda utilizar Nylon o fibra de vidrio que poseen excelentes propiedades de resistencia térmica y además mantienen la velocidad de propagación del sonido muy cercana a la del PVC, evitando así que haya alta impedancia acústica entre los diferentes medios por donde va a viajar la señal.
- En caso en que los sensores sean instalados directamente sobre el *flow line*, se recomienda utilizar zapatas ultrasónicas con diferentes ángulos las cuales permiten disminuir la impedancia acústica que se genera entre el acero y los otros medios (roca-lodo).
- Se recomienda la compra de los cristales piezo-eléctricos del tamaño a los cuales se van a instalar en la tubería final, cortarlos implica que la frecuencia de oscilación natural del cristal no será exactamente igual a los demás generando desviaciones adicionales a los datos.
- Los experimentos realizados se hicieron con los equipos e insumos con los que contaba el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, se recomienda realizar un

grupo de pruebas adicionales, con instrumentación de mayor precisión y con cavings de mayor tamaño con el fin aumentar el alcance del modelo planteado en la investigación.

- A medida que aumenta el tamaño y la concentración de cavings, la desviación del modelo aumenta debido a la diferencia de frecuencias que se detectaron en el sistema durante las pruebas realizadas. Se recomienda aumentar el número de experimentos para roca con mayor tamaño, que permita disminuir la desviación estándar del modelo. Además se recomienda aumentar el tamaño del equipo (tanques y tubo) para evitar que la roca se atasque en la salida del tubo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. ASTM D2845 International, West Conshohocken, PA, 2008
- [2] Aritomi, M., Kikura, H., & Susuki, Y. Ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement. EN: 4th Workshop on Measurement techniques for stationary and Transient Two-Phase flows. Rossendorf November 2000. 21 p.
- [3] Brito, D., Nataf, H.-C., & Cardine, P. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium EN: Experiments in fluids. Abril 2001. vol 31, No 2, p. 653-663.
- [4] Hisao, I., DeVilbiss J. Compressional and Shear Waves in Saturated Rock During Water-Steam Transition. EN: Journal of geophysical research. Agust 1979. Vol 84, No 9, p 4731-4735.
- [5] Cox, Ben. Acoustic for ultrasound imaging.: Academic press. Enero 2013. 79 p.
- [6] Khalid, G. A. The Effect of Doppler Phenomenon on the Speed of Blood Flow. EN: Al-Khwarizmi Engineering Journal. Abril 2012. Vol 8, No4, p. 26-39.
- [7] King, M. S. Wave velocities in rocks as a function of changes in overburden pressure and pore fluid saturants. EN: Society of Exploration geophysicists. Marzo 1966. Vol 6, No 1, p 12-19.
- [8] LOIC BRANCHERIAU, G. A. Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (picea abies). EN: Journal of physics Julio 2012. Vol 353, No 1, p. 1-13.
- [9] Lynnworth, L. C. Ultrasonic measurements for process control.: Academic press Agosto 1989. 694 p.
- [10] Messer, M. Pulsed ultrasonic doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillaries. Tesis de maestría. Georgia institute of technology. December 2005. 273 p.
- [11] Miliarium - Lodos de perforación. [Online]
<URL:http://www.miliarium.com/proyectos/estudioshidrogeologicos/anejos/metodo_sperforacion/lodos_perforacion.asp.> [cited: 15 de Febrero 2016].

- [12] Müller, G. Theory of Elastic Waves.: Postdam. Abril 2007. 236 p
- [13] Multiphysics, C. Introduction to comsol multiphysics. [Online]
 <URL:<http://cdn.comsol.com/documentation/5.1.0.180/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.> [Cited: 12 Febrero 2016].
- [14] OMEGA. (s.f.). Medidores de flujo volumétrico. [Online]
 <URL:<http://www.omega.com/prodinfo/ultrasonicflowmeters.html>> [Cited: 15 Febrero 2016].
- [15] Peter Holstein, H. J.-M. Ultrasonic pig detection at pipelines. EN: PPSA Seminar, Sydney Noviembre 2010. 12 p.
- [16] Ramírez L, Gómez O. Herramienta software para automatizar la interpretación de pruebas en el laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano de petróleo. Tesis de pregrado en ingeniería de sistemas. Universidad Industrial de Santander. Abril 2011.
- [17] Richard J. Whitson, G. J. An overview of non-invasive flow measurement methods. EN: The Americas workshop, New York. 2009. 23 p.
- [18] System, N. M. An introduction to non-invasive ultrasonic flow metering. East Kilbride. 2013. 23 p.
- [19] Takaeda, Y. Velocity profile measurement by ultrasound doppler shift method. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol 7. No 4. Diciembre 1986. P. 313-318.
- [20] Takaeda, Y. Velocity profile measurement by ultrasonic doppler method. Experimental Thermal and Fluid Science. vol 10. No 4. May 1995. Pages 444–453.
- [21] Timothy G. Leighton, J. J. Demonstration comparing sound wave attenuation inside pipes containign bubbly water and water droplet fog. Journal Acoustical Society of America. Vol 9. No 2. Agosto 2010. Pages: 2413–2421
- [22] toolbox, E. (s.f.). *Speed of sounds in liquids*. [Online]
 <URL:http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-liquids-d_715.html> [Cited: 10 Octubre 2016].
- [23] Ulrich Lemmin, T. R. Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 123. No 12. Diciembre 1997. p 1-16.

- [24] W.A.S. Kumara, B. H. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure of oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes. Chemical Engineering Science, Volume 65, No 15. Agosto 2010, p 4332–4349
- [25] Wikipedia. Attenuation. [Online]
<URL:<https://en.wikipedia.org/wiki/Attenuation>>. [Cited: 15 de Febrero de 2016]
- [26] Wikipedia. Doppler effect. [Online]
<URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect>. [Cited: 29 de Febrero de 2016]
- [27] Wikipedia. Snell's Law. [Online]
<URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law>. [Cited: 1 de Marzo de 2016]
- [28] Wikipedia. (s.f.). Ensayos ultrasónicos. [Online]
<URL:http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing>. [Cited: 01 Febrero 2016].
- [29] Yan, Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. Science Technology. Vol 7. No. 1. Marzo 1996. p 1687-1706.

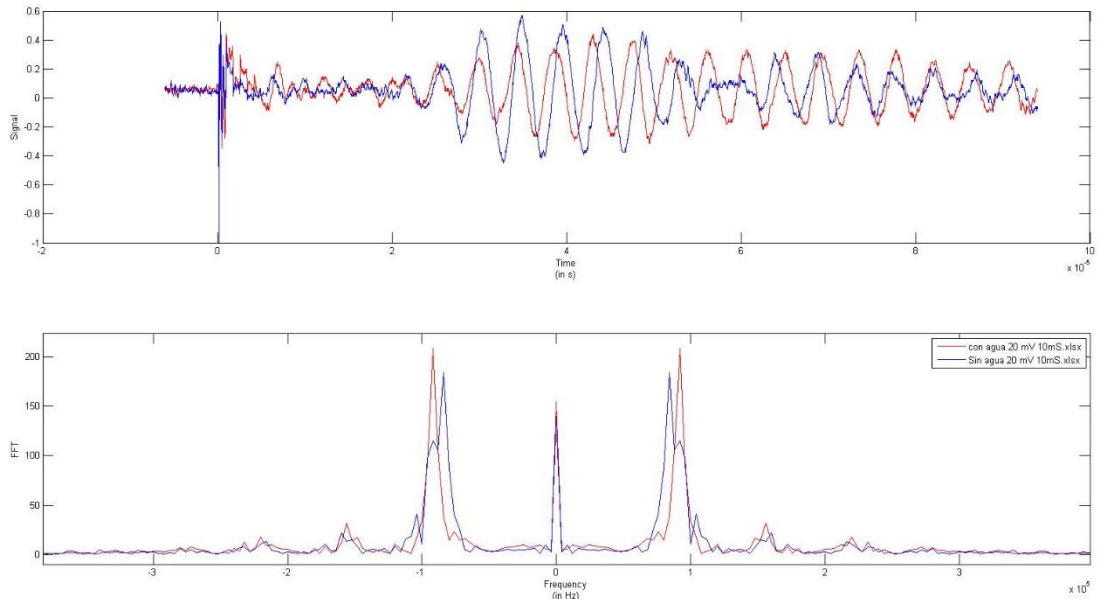
ANEXOS

1. TÉCNICA ACÚSTICA Y AJUSTES DE LA METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de los datos utilizamos la transformada rápida de Fourier con el fin poder determinar la frecuencia del experimento y así poder establecer los cambios que experimentan los sensores cuando el fluido pasa a través de ellos. Antes de realizar la transformación, es necesario acondicionar la señal y para esto se realiza una etapa de eliminación de ruido de altas frecuencias.

1.1. ELIMINACIÓN DEL RUIDO

Figura 43. Arriba: Señales adquiridas. Abajo: Transformada de Fourier de las diferentes señales.



La transformada discreta de Fourier nos muestra la frecuencia de las diferentes señales. En la Figura 44, se observa que la señal tiene un nivel de DC (u offset) que genera una amplitud muy alta en el espectro a bajas frecuencias. Para eliminar la información de bajas frecuencias, se calcula el valor medio de la señal de la siguiente forma:

$$\frac{\sum_t P_i(t)}{N},$$

Ecuación 10

Donde,

$P_i(t)$, son los valores de amplitud de la señal adquirida y N es el total de datos adquiridos (para el caso de estudio N=2500).

Adicionalmente, se requiere eliminar el pulso del trigger del generador, ya que puede ingresar ruido en diferentes frecuencias de la señal. Para esto se establece en el software de adquisición que coloque el pulso siempre en $t=0$ (eje x), de tal forma que la información de la señal corresponde a los datos a partir de $t = 1.255 \text{ e-}5 \text{ s}$ (Ancho del pulso). La Figura 45 muestra la señal del trigger que es eliminada de la señal que va a ser procesada.

Por último, se aplica un filtro promediador de 7 tabs que permite eliminar componentes de ruido de muy altas frecuencias. La figura 46 muestra la señal resultante después de aplicar estas etapas de pre-procesamiento a las señales.

Figura 44. Pulso generado por el trigger del equipo.

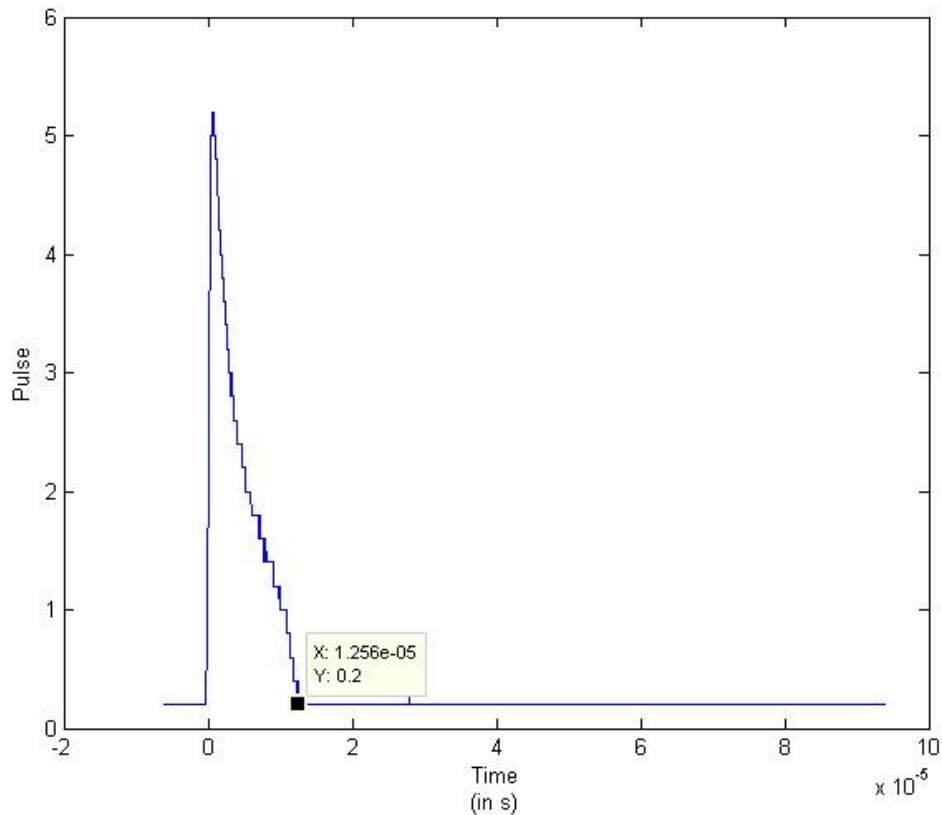
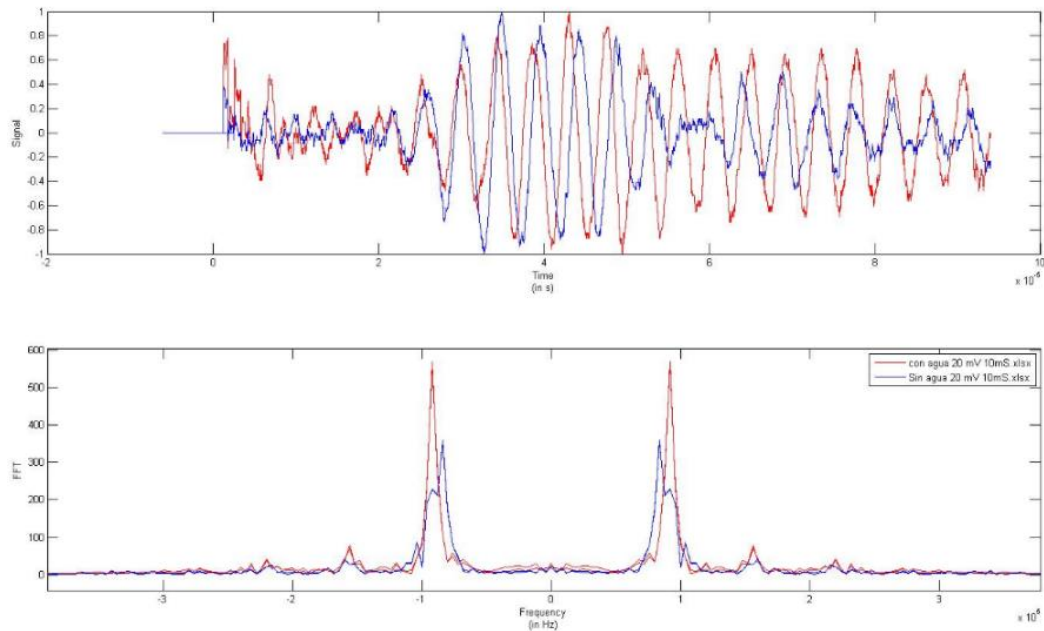


Figura 45. Arriba: Señal adquirida con los ajustes. Abajo: Transformada de Fourier resultante.

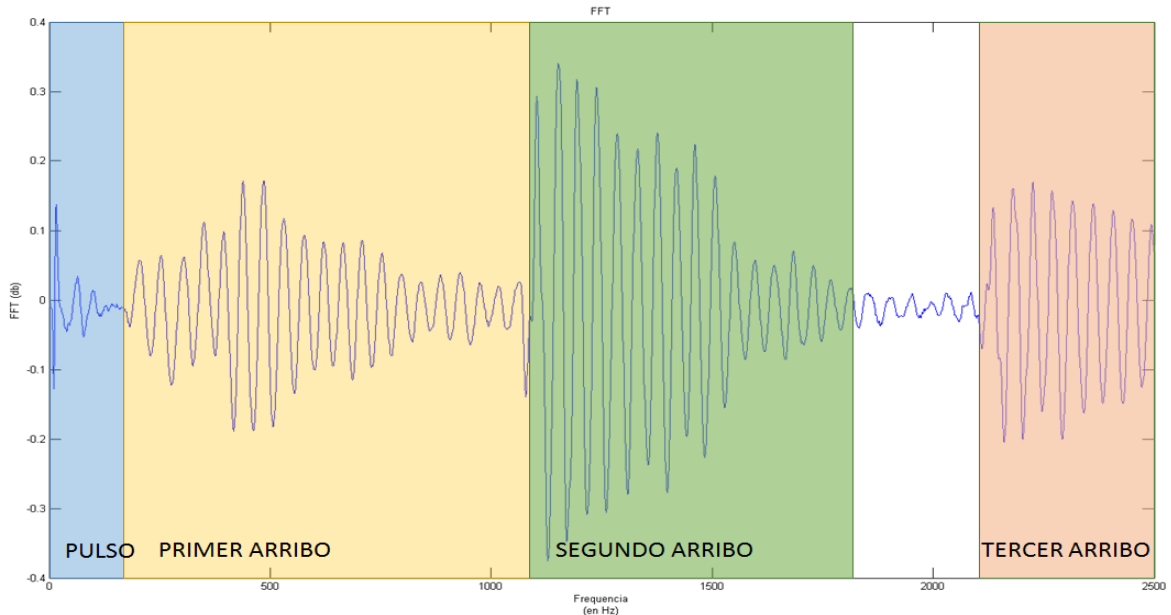


1.2. DETERMINACIÓN DE LOS ARRIBOS DE LA SEÑAL DE LA SEÑAL ACÚSTICA

Para el desarrollo de la aplicación, es necesario reconocer las diferentes partes que conforman la señal recibida. Esto significa entender el recorrido que la señal de ultrasonido hace a través de los diferentes materiales antes de llegar al receptor. Cuando se utiliza la configuración de cristales consecutivos, o sea cuando se utiliza el cristal emisor E y el cristal receptor R1 (Figura 19), se generan dos tipos de arribo diferentes.

El primer arribo (o la primera llegada) de la señal, corresponde a aquella señal que viaja a través del tubo de PVC, ya que es el camino más corto. Sin embargo, cuando hay un fluido en el tubo es de gran importancia conocer los diferentes arribos, para descartar las señales que no corresponden a las propiedades del fluido, es por esto que la transformada de Fourier sólo se hace utilizando las áreas de las señales que corresponden a los arribos de la señal viajando por el fluido (Ver figura 47).

Figura 46. Señal acústica con sus diferentes arribos. Franja azul: Pulso generado por el equipo. Franja amarilla: Señal que llega al receptor por el espesor del tubo de PVC. Franja verde: Señal que llega al receptor por el fluido. Franja roja: Segundo arribo de la señal.



Ahora, si cambiamos la configuración a los cristales enfrentados (Emisor: E, receptor R2 en la figura 19), la onda sólo puede viajar por el fluido, ya que los cristales del experimento se encuentran demasiado lejos para atravesar el tubo en espiral.

La figura 47 muestra en detalle cada una de las partes que forman la señal recibida cuando los cristales se encuentran en configuración enfrentada.

Se realizó una simulación del procedimiento utilizando COMSOL multiphysics. En la figura 47 se ilustra en detalle cómo se propaga la onda acústica a través del PVC. En ésta imagen se puede observar que la señal que se propaga por el espesor del tubo se atenúa rápidamente siendo indetectable por el cristal emisor.

Figura 47. Señal acústica con sus diferentes arribos. Franja azul: Pulso generado por el equipo. Franja verde: Señal que llega al receptor por el fluido. Franja roja: Segunda señal que llega al receptor por el fluido.

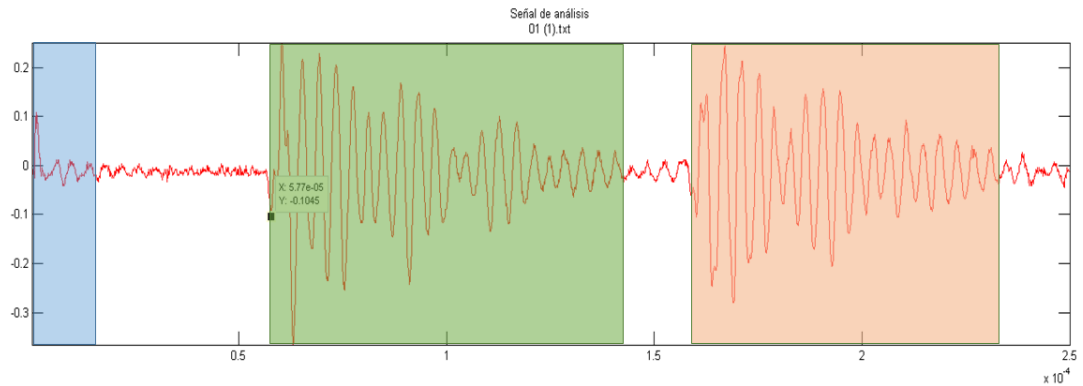


Figura 48. Simulación en COMSOL multiphysics. Izquierda: Corte transversal del tubo, respuesta de la señal a través de un fluido. Derecha: Comportamiento de la señal a través del espesor del PVC.

