



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

GEOFÍSICA DE LA TIERRA SÓLIDA

**“Estudio de la respuesta elastodinámica inducida por flujos viscosos
usando técnicas experimentales y numéricas.”**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

Gerardo Manuel Mendo Pérez

TUTOR:

**Dra. María Alejandra Arciniega Ceballos
Instituto de Geofísica, UNAM**

JURADO:

**Dr. Francisco José Sánchez Sesma
Instituto de Ingeniería, UNAM**

**Dr. José Enrique Guzmán Vázquez
Instituto de Ingeniería, UNAM**

**Dr. Miguel Ángel Alatorre Ibarguengoitia
Universidad de las Ciencias y las Artes de Chiapas, México**

**Dra. María Jazmín Chávez Álvarez
Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, UNAM**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Enero, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Introducción | 4 |
| Capítulo 1. Interacción Flujo – Sólido | |
| 1.1 <i>Flujo de fluidos en conductos</i> | 5 |
| 1.2 <i>Ecuaciones gobernantes</i> | 5 |
| 1.2.1 <i>Ecuación de Navier – Stokes</i> | 6 |
| 1.2.2 <i>Ley de Hagen – Poiseuille</i> | 8 |
| 1.2.3 <i>Ecuación de la energía</i> | 8 |
| 1.3 <i>Interacción flujo – sólido y Modelo CRACSS</i> | |
| 1.3.1 <i>Interacción flujo – sólido</i> | 10 |
| 1.3.2 <i>Modelo CRACSS</i> | 11 |
| Capítulo 2. Método experimental | |
| 2.1 <i>Sistema analógico experimental</i> | 14 |
| 2.2 <i>Instrumentación</i> | 14 |
| 2.3 <i>Procedimiento experimental</i> | 17 |
| 2.4 <i>Manejo de material visual</i> | 18 |
| 2.5 <i>Procesamiento de señales experimentales</i> | 18 |
| Capítulo 3. Descripción de resultados | |
| 3.1 <i>Caracterización del sistema experimental</i> | 22 |
| 3.2 <i>Respuesta del sistema a flujos de diferentes características</i> | |
| 3.2.1 <i>Experimentos con agua</i> | 27 |
| 3.2.2 <i>Experimentos con glicerina</i> | 33 |
| 3.3 <i>Sincronización señal – video</i> | 38 |
| Capítulo 4. Validación numérica del efecto fluido-sólido del modelo experimental: Comparación de datos observados vs sintéticos | |
| 4.1 <i>Descripción de sintéticos</i> | 48 |
| 4.2 <i>Comparación entre resultados</i> | 62 |
| Capítulo 5. Discusión y conclusiones | 68 |
| Apéndice A. Piezoelectricidad | 71 |
| Bibliografía | 74 |

Agradecimientos

En este trabajo está involucrado, de manera directa o indirecta, el esfuerzo y el apoyo de muchas personas. Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo durante dos años a través de su sistema de becas, al proyecto PAPIIT IN105716 y al proyecto CONACYT – SENER del Instituto de Ingeniería de la UNAM por el aporte realizado para poder realizar este trabajo. A la Dra. María Alejandra Arciniega Ceballos, al Dr. José Enrique Guzmán Vázquez y al Dr. Francisco José Sánchez Sesma por la enseñanza, los consejos y el arduo trabajo. A los compañeros: M.C. Alejandro Rosado Fuentes, Ing. Juan Carlos Montiel, M.I. Jonathan Hernández García, Ing. Marcel André Ramírez Tocherie, Ing. Diego Galaviz, a Gerardo Juárez Chávez y a Alan Josue Olvera Mata, todos parte del grupo de flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM a cargo del Dr. José Enrique Guzmán Vázquez, por el apoyo en los aspectos técnicos de la parte experimental, en el diseño y en la construcción del sistema experimental. De manera personal agradezco especialmente a mis padres, Eduardo Mendo Vázquez y Alicia Beatriz Pérez Arriola, por todo el apoyo incondicional que me han brindado, a mis hermanos, a mis familiares y a mis amigos. Agradezco también a todas las personas que han sido mis maestros desde la etapa básica hasta el Posgrado ya que cada uno de ellos ha aportado una semilla en mi formación académica y personal.

Introducción

La sismología volcánica comprende el análisis de las señales sísmicas y su relación con la actividad eruptiva, además del desarrollo de modelos teóricos y experimentales que expliquen la fuente y la dinámica en el interior de los volcanes. Los procesos que toman lugar durante la actividad volcánica, desde el interior de la corteza hasta la emisión en superficie, interactúan con el medio que los rodea y el resultado se da en la respuesta elástica del medio, la cual se puede registrar. Debido a que es imposible observar la evolución del fenómeno volcánico se han desarrollado modelos teóricos y experimentales con el objetivo de respaldar las inferencias realizadas. Los modelos teóricos se plantean bajo los principios físicos que rigen el mundo macroscópico; sin embargo, los resultados obtenidos necesitan ser validados, ya sea a través de observaciones de campo o mediante pruebas de laboratorio. El presente trabajo se centra en uno de los procesos fundamentales en sistemas dinámicos: El transporte de fluidos a través de conductos cerrados. Este proceso ha sido ampliamente estudiado en varias ramas de la ciencia y la ingeniería: en el ámbito volcánico las señales de largo periodo se asocian al transporte de fluidos (Chouet, 1985; Chouet, 1996; Julian, 1994; Nishimura y Chouet, 2003), en el ámbito de la medicina se estudia el efecto de las señales producidas por el transporte de fluido sanguíneo a través de venas y arterias (Bazilevs et al., 2006), en la industria de la geotermia se estudia el efecto de acoplamiento entre el vapor de agua y los conductos de recuperación; entre otras aplicaciones. El objetivo de este trabajo consiste en demostrar, bajo un esquema experimental, la relación del transporte de fluido con el origen de señales de largo periodo a través de un sistema de conductos. Se hace uso de flujos análogos, de características diferentes entre sí para observar su influencia en las señales. Posteriormente se realiza la comparación de los resultados experimentales con señales sintéticas obtenidas a través de un esquema teórico que relaciona el origen de las señales de LP con la interacción entre el flujo de fluido y el conducto (Corona - Romero et al., 2012).

Capítulo 1. Interacción fluido – sólido

1.1 Flujo de fluidos en conductos

En este trabajo se estudia el efecto del flujo de fluidos viscosos en conductos verticales y la respuesta elástica de los mismos. El flujo se origina por una caída súbita de presión que genera un gradiente de presión dentro del conducto. Los parámetros geométricos del conducto y los parámetros físicos, tanto del medio como del fluido, son factores que influyen en el desarrollo del flujo. Se entiende que un flujo está *completamente desarrollado* cuando el perfil de velocidades no varía más según avanza el fluido por el conducto.

Las fuerzas viscosas conducen a la formación de la capa límite debido a la adherencia del fluido en las paredes del conducto. En esta región se generan esfuerzos viscosos (condición de no deslizamiento) y como consecuencia un gradiente de velocidad perpendicular a la dirección de flujo (Munson et al., 2002; Smits, 2000).

A nivel microscópico la naturaleza del flujo depende del intercambio de momento entre moléculas cuyo movimiento es aleatorio. Macroscópicamente esa naturaleza laminar, en transición, o turbulenta, puede determinarse a partir de las trayectorias de las partículas de fluido y con el *Número de Reynolds*. En un régimen laminar completamente desarrollado el perfil de velocidades siempre es el mismo, la velocidad es tangente a las líneas de flujo (Munson et al., 2002) y éstas son constantes en el tiempo y espacio; en contraste, las líneas de flujo son aleatorias.

1.2 Ecuaciones gobernantes

1.2.1 Ecuaciones de Navier – Stokes

Es la ecuación de movimiento de los fluidos que incluye los efectos viscosos. Junto con la ecuación de conservación de masa dan una descripción completa del comportamiento de los flujos (Munson et al., 2004). Si los efectos viscosos no cambian en el tiempo, entonces se considera como un flujo Newtoniano.

Para un flujo incompresible (densidad invariable en el tiempo) y Newtoniano las ecuaciones de Navier - Stokes se expresan como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

donde \mathbf{u} , \mathbf{g} son los vectores de velocidad de flujo y gravedad respectivamente, p es la presión y μ es la viscosidad dinámica del flujo. Los términos del lado izquierdo corresponden a las fuerzas inerciales y advectivas del flujo mientras que los términos del lado derecho son las fuerzas externas que influyen sobre el flujo. Como se trata de un sistema de ecuaciones no lineal, en general no es posible obtener soluciones analíticas.

1.2.2 Ley de Hagen – Poiseuille

Para un flujo laminar, incompresible y continuo que viaja a través de una sección cilíndrica es posible obtener una solución exacta de las ecuaciones de Navier – Stokes. Considerando la geometría de la figura 1.1, que el flujo es continuo y axisimétrico y que las líneas de flujo son paralelas a las paredes del conducto, entonces la velocidad del flujo sólo está en función del radio $\mathbf{u} = u_r(r)\hat{i}$ (Munson et al., 2002).

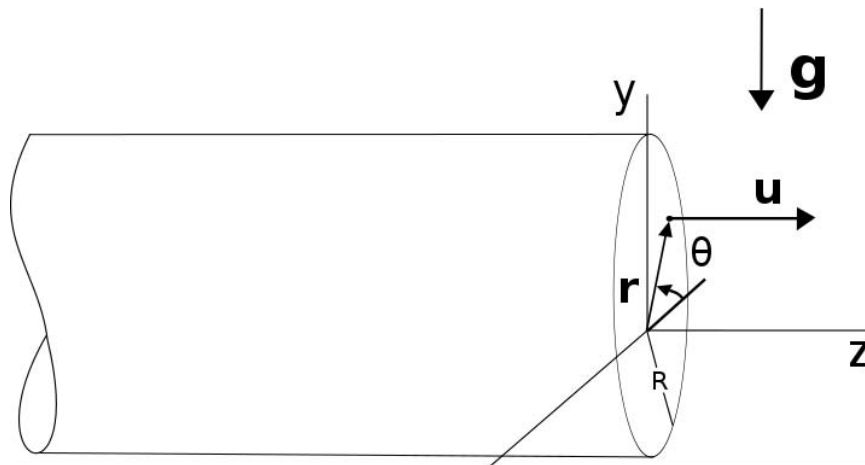


Figura 1.1 Diagrama de un conducto cilíndrico horizontal de radio R a través del cual pasa flujo viscoso con velocidad \mathbf{u} . Tomado de Munson et al., 2002.

La ecuación de continuidad es (Landau & Lifshitz, 1970)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = 0 \quad (2)$$

Entonces las ecuaciones (1) y (2) se reducen a

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3a)$$

$$\nabla p + \rho \mathbf{g} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3b)$$

En coordenadas polares, la ecuación (3b) se expresa como

$$\nabla p + \rho \mathbf{g} = \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] \quad (4)$$

La ecuación 4 en sus respectivas componentes se expresa como

$$-\rho g \sin \theta - \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (5a)$$

$$-\rho g \cos \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad (5b)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] = 0 \quad (5c)$$

Integrando las ecuaciones (5a) y (5b) obtenemos

$$p = -\rho(r \sin \theta)g + f_1(z) = -\rho g y + f_1(z) \quad (6a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = f_2(z) \quad (6b)$$

Las ecuaciones (6a) y (6b) muestran que el gradiente de presión dentro del conducto sólo está en función de la dirección de flujo (Munson et al. 2002). Al resolver la ecuación (5c) para \mathbf{u} entonces queda la expresión

$$u_z = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) r^2 + c_1 \ln r + c_2 \quad (7)$$

En $r = 0$ la velocidad u_z debe ser finita entonces $c_1 = 0$; y en $r = R$, $u_z = 0$ entonces

$$c_2 = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) R^2 \quad (8)$$

Por lo tanto, la ecuación (7) se reescribe como

$$u_z = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) (r^2 - R^2) \quad (9)$$

Si consideramos una sección anular $dA = 2\pi r dr$ dentro de la geometría de la Figura 1.1 podemos determinar la relación entre el gasto volumétrico y el gradiente de presión dentro del conducto. El gasto Q en una sección transversal dA se describe mediante la ecuación

$$Q = \int_A \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA \quad (10)$$

Donde \mathbf{u} es el vector de velocidad del flujo y \mathbf{n} es un vector normal a la sección de área transversal dA . Esta ecuación se reescribe, considerando la sección anular mencionada anteriormente,

$$Q = 2\pi \int_0^R u_z r dr \quad (11)$$

Usando la ecuación (9) y tomando en cuenta que el gradiente de presión está relacionado a la caída de presión Δp a lo largo de una sección de tubería de longitud l , entonces el gasto volumétrico se reescribe como

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu l} \quad (12)$$

A esta ecuación se le conoce como la *Ley de Poiseuille* y los flujos con perfiles de velocidad que obedecen a la ecuación (9) son flujos tipo *Hagen – Poiseuille*. Esta solución es para flujos estrictamente laminares y la forma del perfil de velocidad (ecuación 9) es parabólica (Munson et al., 2002).

1.2.3 Ecuación de la energía

La pérdida de energía en un flujo incompresible y newtoniano se relaciona con las fuerzas de viscosidad que se generan por la fricción interna entre capas del flujo, los esfuerzos cortantes en la región de contacto entre el flujo y el conducto, la pérdida de carga hidrostática, entre otros factores (Munson et al., 2002). En general, la ecuación de la energía para un flujo estacionario (o permanente) es:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) + z_2 + h_L \quad (13)$$

donde p_1 es la presión en el punto 1, p_2 es la presión en el punto 2, v_1 es la velocidad del flujo en el punto 1, v_2 es la velocidad del flujo en el punto 2, g es el valor de la aceleración de la gravedad, y

$\gamma = \rho g$ es el peso específico del fluido; α_1, α_2 son coeficientes de energía cinética que reflejan la forma del perfil de velocidad del flujo: si son mayores a 0, entonces el perfil de flujo no es uniforme, mientras que si son iguales a 1 entonces el perfil es uniforme.

El *factor de pérdida* h_L representa la pérdida de energía por todas las causas mencionadas anteriormente (Munson et al., 2002). Si $h_L = 0$ entonces el flujo no tiene pérdida de energía y a la ecuación se le conoce como *Ecuación de Bernoulli*.

Si la velocidad no cambia entre dos puntos p_1 y p_2 en una sección de conducto, entonces la ecuación (13) se reescribe

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2\right) = h_L \quad (14)$$

Consideramos que

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2\tau}{r} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{2\tau_w r}{D} \quad (16)$$

donde τ_w es el esfuerzo cortante debido al condición de no deslizamiento en las paredes de la tubería, l es la longitud del conducto, D es el diámetro del conducto, r es el radio del conducto. La ecuación (15) resulta del balance entre las fuerzas viscosas y la presión dentro del conducto para un flujo completamente desarrollado donde la velocidad no cambia dentro de una sección de conducto horizontal, y la ecuación (16) es la distribución de los esfuerzos cortantes dentro del conducto (Munson et al., 2002). Entonces, comparando las ecuación (14) con las ecuaciones (15) y (16) obtenemos el factor de pérdida

$$h_L = \frac{4\tau_w l}{\gamma D} \quad (17)$$

El factor de pérdida por uso de componentes (como codos, uniones, válvulas, etc.) en un sistema de tuberías está dado por la relación (Munson et al., 2002)

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (18)$$

donde K_L es el coeficiente de pérdida por los componentes que conforman el sistema de tuberías, V es la velocidad promedio de flujo y g es la aceleración de la gravedad. El coeficiente K_L está relacionado con la pérdida de energía de flujo debida a acoplamiento imperfecto entre tubería y componente, así como a la geometría de los componentes. Se diseñan de tal forma que al unirse aseguran la continuidad en el diámetro interno de la tubería, pero en realidad se pueden presentar espacios en las uniones, debido al acoplamiento imperfecto, que cambian el diámetro interno y contribuyen a la pérdida de energía del flujo. Se consideran como *pérdidas menores* porque su contribución es menor en comparación con las pérdidas por fricción en secciones de tubería, llamadas *pérdidas mayores*; sin embargo, no en todos los casos es de esta manera (Munson et al., 2002). Si existen varios componentes acoplados en la tubería la superposición de cada una de las pérdidas por cada componente puede influir en la velocidad del fluido.

1.3 Interacción flujo – sólido y modelo CRACSS

1.3.1 Interacción flujo - sólido

El flujo, independientemente del mecanismo que lo origine, interactúa con el medio que lo confina. Entonces la dinámica del fluido se acopla con la dinámica del sólido en la frontera entre éstos (Tijsseling, 1996; Corona-Romero et al., 2012).

Esta interacción considera la relación entre las leyes de la dinámica de fluidos con la elastodinámica o la mecánica estructural. Considera la respuesta elástica del medio al paso del flujo; si el flujo se sostiene, entonces la interacción entre el líquido y el sólido se convierte en un ciclo de esfuerzo – deformación. El proceso es no lineal, complicando la obtención de una solución analítica que describa este proceso; en la práctica se recurre a utilizar aproximaciones numéricas que simulan este proceso.

La interacción flujo – sólido es un proceso ampliamente estudiado en varias áreas, principalmente en la aeronáutica, la ingeniería civil y el área médica. Algunas de las aplicaciones donde se estudia detalladamente este proceso son, por ejemplo, en el diseño de aviones para análisis de compresibilidad de flujos (Bathe, 1998), en el análisis del flujo de sangre en arterias (Bazilevs et al., 2006), entre otros. En el ámbito volcánico se han relacionado los tremores volcánicos con las expansiones y contracciones del conducto debido al flujo de fluidos (Julian, 1994); otro trabajo estudia la propagación de la onda acústica en un conducto lleno de fluido (Balmforth et al., 2005). Sin embargo, considerar el proceso de interacción entre el flujo y el conducto requiere resolver lo que

sucede en la frontera líquido – sólido; por lo tanto se deben de establecer condiciones de frontera que cumplan con lo anterior.

1.3.2 Modelo CRACSS

El modelo CRACSS (así nombrado por las siglas de sus autores) es una formulación teórica que considera la interacción dinámica entre el flujo de un fluido laminar y newtoniano con las paredes de una cavidad cilíndrica que lo confina. Se asume que la cavidad o conducto está inmerso en un espacio homogéneo y elástico. Asimismo considera que el flujo es producido por una perturbación en la presión en el sistema, al cual se le atribuye una *función de excitación*. Los extremos del conducto tienen presiones distintas, siendo la presión en el extremo inferior mayor que la presión en el extremo superior, lo que origina un gradiente de presión a lo largo del conducto (*ver Figura 1*) (Corona – Romero et al., 2012).

Las premisas establecidas como punto de partida para desarrollar el modelo teórico son las siguientes:

- El frente de flujo asume un perfil Hagen – Poiseuille; por lo tanto sólo es válido para flujo laminar, incompresible y Newtoniano.
- El desplazamiento del conducto tiene la componente radial como la componente vertical. El radio varía uniformemente en dirección azimutal (es decir, en θ), por lo tanto, es constante.

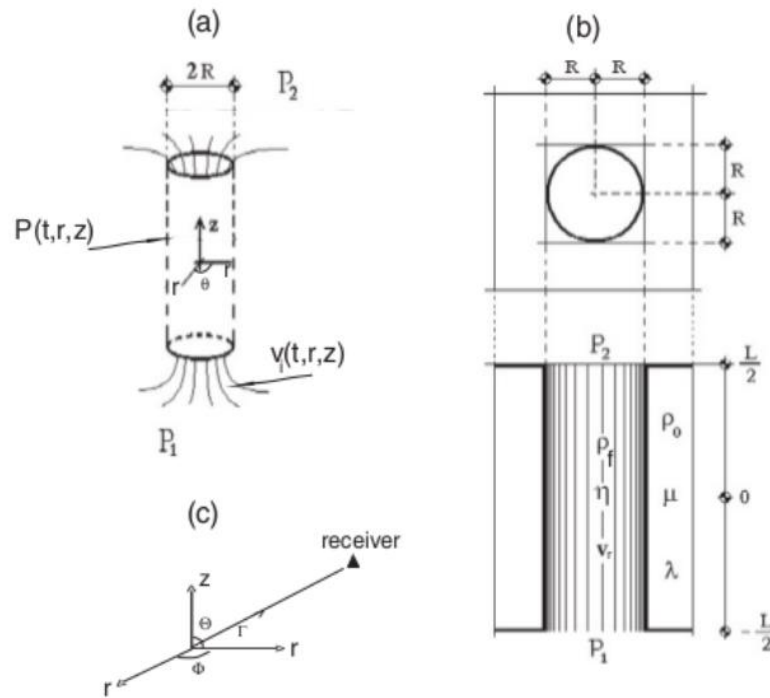


Figura 1.1 Esquema de la geometría del conducto considerado en CRACSS.

Como condiciones iniciales el fluido está en reposo y el radio del conducto es igual al radio inicial. Las condiciones de frontera son las siguientes (Corona – Romero et al., 2012):

- Las presiones son inversamente proporcionales a la velocidad del flujo y al área de sección transversal; este efecto está descrito por la ecuación de Bernoulli (ver sección 1.2.3 *Ecuación de la energía*).
- Los esfuerzos generados por el flujo son iguales a los esfuerzos generados por las paredes del conducto en la frontera líquido – sólido (continuidad de esfuerzos).
- La velocidad radial del flujo en el centro del conducto es cero y en las paredes del conducto es igual a la velocidad de oscilación del conducto.

Las bases físicas del modelo se encuentran de las leyes de conservación de masa para fluidos, la Ley de Hagen-Poiseuille y las ecuaciones de Navier - Stokes. Las ecuaciones que conforman el modelo CRACSS incluyen la ecuación para la velocidad vertical del flujo (Corona – Romero et al., 2012):

$$v^z(t, r, z) = \frac{3}{2R} (R^2 - r^2) \langle w^z(t) \rangle_r - 5 \frac{\dot{R}}{R} \left(\frac{r}{R}\right)^3 z \quad (19)$$

$$v^r(t, r) = \dot{R} \left(\frac{r}{R}\right)^4 \quad (20)$$

$$\partial_t \langle w^z \rangle_r = \frac{P_1 - P_2 + \rho_f L g}{\rho_f L} - \left(\frac{6\eta}{\rho_f R^2} + \frac{3\dot{R}}{4R} \right) \langle w^z \rangle_r \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \ddot{R} = & -\frac{24}{48\rho_0 R^2 + 5\rho_f L^2} \left(\frac{3}{8} \rho_f L \langle w^z \rangle + 2\rho_0 R^2 A + \left(34 - \frac{15}{4} \left(\frac{L}{R}\right)^2 \right) \eta + \rho_f \left(\frac{5L^2}{2R} + \frac{R}{9} \right) \dot{R} \right) \dot{R} \\ & - \frac{48}{48\rho_0 R^2 + 5\rho_f L^2} \left(\frac{3}{5} \rho_f \langle w^z \rangle^2 - \frac{P_2 + P_1}{2} + 2(\mu + \lambda) \frac{R - R_0}{R_0} \right) R \end{aligned} \quad (22)$$

$$\ddot{u}^z(t, R, z) = \frac{3\eta}{\rho_0 R^2} \langle w^z \rangle_r - \frac{\mu}{\rho_0 R^2} u^z - A \dot{u}^z \quad (23)$$

donde P_1 es la presión inferior, P_2 es la presión superior, R es el radio del conducto, R_0 es el radio inicial del conducto, ρ_f es la densidad del fluido, ρ_0 es la densidad del sólido, L es la longitud del conducto, μ y λ son las constantes de Lamé, η es la viscosidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad, w^z es la velocidad del fluido en dirección vertical. Se resuelve el campo de velocidades del flujo y la variación del conducto en dirección radial y vertical a través de un algoritmo de integración numérica Runge – Kutta de quinto orden (Corona – Romero et al., 2012).

Capítulo 2. Método experimental

2.1 Sistema analógico experimental

Para observar y cuantificar la interacción de un flujo viscoso con las paredes del conducto por el cual fluye se diseñó un sistema experimental para generar flujo dada una caída súbita de presión. El sistema consiste de secciones de tubos de Cloruro de Polivinilo (PVC marca Spears cédula 80 de alta presión) conectados de tal manera que una sección de PVC transparente, denominada *sección de pruebas*, permita observar y filmar el flujo. La longitud total del sistema de tuberías es de 4.22 m, el diámetro interior de la tubería es de 0.025 m y la longitud de la sección de pruebas es de 0.60 m de longitud (*ver Figura 2.1*).

El sistema de tubos se conecta a dos contenedores de plástico de 200 litros de capacidad: El contenedor número **1**, que se encuentra a 2 m de altura, almacena el fluido de los experimentos y el contenedor número **2**, montado a 1.8 m de altura del suelo, contiene y retiene el fluido eyectado de la sección de pruebas.

Para control de la presión y volumen de fluido se adaptaron tres válvulas en el sistema: a) *válvula principal*, de 1" de diámetro interno, se encuentra antes de la sección de pruebas y sirve como mecanismo detonador al liberar el aire comprimido, b) *válvula secundaria*, de 1" de diámetro interno, situada al inicio de la sección horizontal de tubería (*ver Figura 2.1*), es una válvula auxiliar que se utiliza para sellar el sistema para darle mantenimiento. Las dos válvulas restantes, de 1/4" de diámetro interno, conectan el compresor con el sistema y restringen el flujo de aire cuando es necesario; una de las válvulas está conectada al contenedor 1 mientras que la otra está conectada en uno de los codos (*ver Figura 2.1*).

El cierre de las válvulas aísla el sistema de la alimentación del fluido; la válvula principal aísla la sección de pruebas. La presurización se lleva a cabo inyectando aire al sistema a través de un compresor mientras están cerradas las válvulas.

2.2 Instrumentación

La sección de pruebas se instrumentó con sensores piezoeléctricos (Piezofilms) con ancho de banda 0.001 Hz – 1 GHz. Convierten la deformación por tensión o compresión en cualquier dirección de su superficie en una diferencia de potencial gracias al del fenómeno de la *piezoelectricidad* (*ver Apéndice B*). Cuando el flujo pasa a través de la sección de pruebas el sensor registra las deformaciones en tres direcciones: radial, transversal y axial. Dependiendo de la orientación del piezoeléctrico será la componente dominante del sistema. Los sensores están acoplados a la superficie de la sección de pruebas de manera que la componente registrada es la radial.

La diferencia de voltaje que resulta de la diferencia de área en el sensor es registrada por un sistema de adquisición de datos, que consiste de una tarjeta National Instruments DAQ USB 6356 de 16 canales (8 canales analógicos y 8 canales digitales) que pueden adquirir datos de manera simultánea a una tasa de muestreo de 1 250 000 muestras por segundo por canal, y 4 canales analógicos de salida que trabajan a 3 330 000 muestras por segundo. Las líneas I/O digitales trabajan a 24 bits con velocidad máxima de 10 MHz y el gatillo puede ser analógico o digital (National Instruments, 2014). La conexión al sistema DAQ se realiza a través de un puerto USB; las señales son adquiridas y guardadas en un programa diseñado en LabVIEW (Arciniega et al., 2011; Arciniega et al., 2014). Los sensores se conectan vía BNC al sistema de adquisición de datos; los ocho canales de entrada analógica se utilizan para adquirir las señales, siete de ellos se ocupan para los sensores que se acoplan a la sección de pruebas, y el número ocho se utiliza como gatillo.

En paralelo, durante el experimento, se filma el proceso de descompresión que se desarrolla en la sección de pruebas. Los videos se registran con una cámara de alta velocidad Phantom modelo v2511 con capacidad de registro hasta 1, 000,000 fps (cuadros por segundo), y un máximo de 25,600 fps si la resolución es de 1280 x 800 (VisionResearch, 2014). La cámara y el sistema de adquisición se sincronizan a través de un disparador manual que inicia el proceso de registro tanto de los sensores, como de la filmación del video.

2.3 Procedimiento experimental

Los fluidos utilizados en los experimentos presentan contrastes de viscosidad, del orden de 1000, entre sí: Aire ($0.000001 Pa s$), agua ($0.001 Pa s$) y glicerina ($1.3 Pa s$). El aire se introduce al sistema a través de una manguera que conecta el compresor con el sistema; el agua y la glicerina se introducen a través del segundo contenedor. El sistema se cierra manipulando la válvula principal y se presuriza inyectando aire del compresor; el barómetro ubicado en la parte superior del contenedor 1 indica la presión del aire inyectado. El manejo de la válvula principal es manual. El cambio en la presión del sistema debe ser instantáneo entonces la apertura de la válvula dura típicamente entre 0.05 s – 1 s.

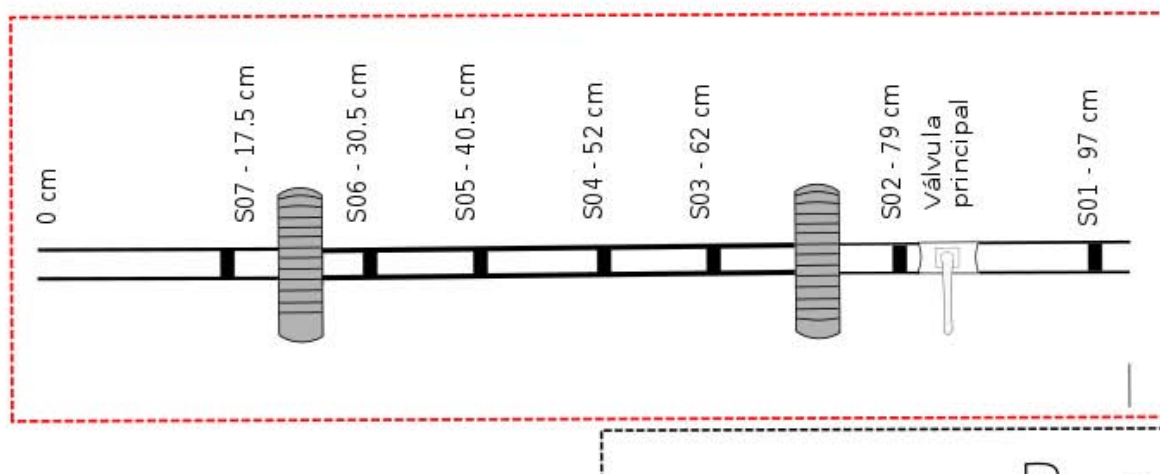




Figura 2.1. Diagrama en dos dimensiones del sistema analógico experimental. El recuadro negro es el zoom de la parte inferior del sistema y el recuadro rojo es el zoom de la sección de pruebas. Las flechas negras indican la entrada de aire, las flechas azules indican la dirección de flujo y la flecha roja indica la descarga del fluido en el sistema.



Figura 2.2. Fotografías del sistema analógico experimental (derecha) y de la distribución de los sensores acoplados a la sección de pruebas, previo a la fase de experimentación (izquierdo).

Una vez abierta la válvula la diferencia de presión entre los extremos del conducto produce un flujo en dirección vertical (debido la presión en la parte inferior del tubo es mayor que la presión en la parte superior). La interacción del flujo con las paredes del tubo que lo confina produce una respuesta elástica del tubo que se va atenuando en el tiempo, debido a la pérdida de energía en el sistema y al retorno al equilibrio de las presiones en los extremos; cuando el gradiente de presión es cero el sistema se equilibra y el fluido deja de moverse. La respuesta elástica del tubo al paso de los diferentes fluidos se registra con los sensores piezoeléctricos (*ver sección 2.2 Instrumentación*); éstos miden el esfuerzo ejercido en dirección normal sobre su superficie, es decir, la variación de área que sufren en su superficie es proporcional a la diferencia de voltaje que emiten. El tiempo de registro depende de la cantidad de muestras por canal y de la tasa de muestreo.

2.4 Manejo de material visual

El manejo de los videos tomados en conjunto con las señales experimentales se hace a través del software PCI de VisionResearch. Permite establecer los valores de contraste, color, velocidad de

grabación, número de cuadros, resolución, entre otros parámetros. La resolución del video es de 1280 x 700 cuadros, con 38 192 cuadros como la longitud total registrada en los experimentos. Dependiendo del tipo de experimento es la velocidad de registro: para los experimentos de agua la velocidad es de 10 000 fps entonces la duración de los videos es de 3.8 s, para glicerina la velocidad es de 1000 fps, entonces la duración es de 38 s. Los videos se guardan en formato cine, propio de los datos adquiridos por el software PCI, y en formato MP4 para su posterior edición. A través del seguimiento de trazadores en el fluido (por ejemplo, burbujas) se puede estimar la velocidad del flujo; en algunos videos se aprecian burbujas aisladas bien definidas. Por último, los registros de video se sincronizan con las señales experimentales procesadas; la sincronización se realiza con el software libre Openshot para ambiente Linux. Este proceso requiere que la señal experimental y el registro de video tengan el mismo tiempo de inicio de registro (gatillo para ambos registros mediante el mismo mecanismo).

2.5 Procesamiento de señales experimentales

La respuesta elástica del conducto tiene relación directa con el paso del flujo dentro del mismo. Hay otros procesos que ocurren al mismo tiempo que pueden estar relacionados, o no, con el transporte de masa del fluido. Por ello se procura separar las señales en diferentes componentes para su análisis y posterior asociación con los procesos observados.

Las señales deben pasar por una fase de *pre-proceso*, que consiste en remover las componentes de las señales ajenas al experimento. Un ejemplo de este tipo de son las componentes periódica de baja amplitud de 60 Hz, originada por ruido que proviene de la instalación eléctrica. En algunos experimentos se identifica ruido de frecuencia muy alta (cercana a la frecuencia máxima) de amplitud sostenida que enmascara los componentes de frecuencias más bajas; el origen es incierto pero puede relacionado con la inestabilidad del sensor, o actividad de máquinas e instalaciones cercanas. Esta componente inicia mucho antes que el experimento mismo, por lo que puede removerse. La remoción de estas componentes se hace a través de filtros tipo Butterworth para los siguientes anchos de banda: 40 - 80 Hz para remover la señal cíclica de 60 Hz, y 20 000 – 25 000 Hz (ó 200 000 – 250 000 Hz según la tasa de muestreo) para remover el ruido de muy alta frecuencia. En la Figura 2.4 se observa una componente de baja frecuencia, dominante en todo el registro, y una componente de alta frecuencia de 0.3 s de duración que aparece “montada” sobre la baja frecuencia. También en este caso, la separación de componentes requiere el uso de filtros, en este caso, pasa banda tipo Butterworth donde el tamaño de los anchos de banda depende de la tasa de muestreo:

a) Si la tasa de muestreo es de 500 000 Hz, entonces las señales se filtran en 100 - 1000 Hz, 1000 - 10 000 Hz y 10 000 - 100 000 Hz

b) Si la tasa de muestreo es de 50 000 Hz, entonces las señales se filtran en 10 - 100 Hz, 100 - 1000 Hz y 1000 - 10 000 Hz.

La componente de baja frecuencia se extrae usando un filtro pasa bajas tipo Butterworth con frecuencia de corte en 10 y 100 Hz, para registros de 40 y 4 s respectivamente. Algunas señales de baja frecuencia son diezmadas para resaltar mejor las características de frecuencias más bajas (ver Figura 2.5). Posteriormente se generaron espectrogramas para observar la evolución del contenido de frecuencias en el tiempo. Se calculan usando ventanas de tiempo que dependen del contenido de frecuencias de la señal. Para las señales de alta frecuencia se trabajó con una ventana de tiempo de 0.004 s con traslapes entre ventanas cada 0.0002 s usando el método de Densidad Espectral de Potencia (PDS); para las señales de baja e intermedia frecuencia las ventanas de tiempo son de 1 s y 0.01 s con traslapes cada 0.1 s y 0.001 s respectivamente.. Los espectrogramas se calcularon para cada una de las componentes filtradas centrando la señal en la ventana. Uno de los espectrogramas calculados se muestra en la Figura 2.6. El eje de las abscisas corresponde al tiempo y el eje de las ordenadas corresponde a la frecuencia; los colores más cálidos corresponden a amplitudes más altas y los colores más fríos son amplitudes más bajas.

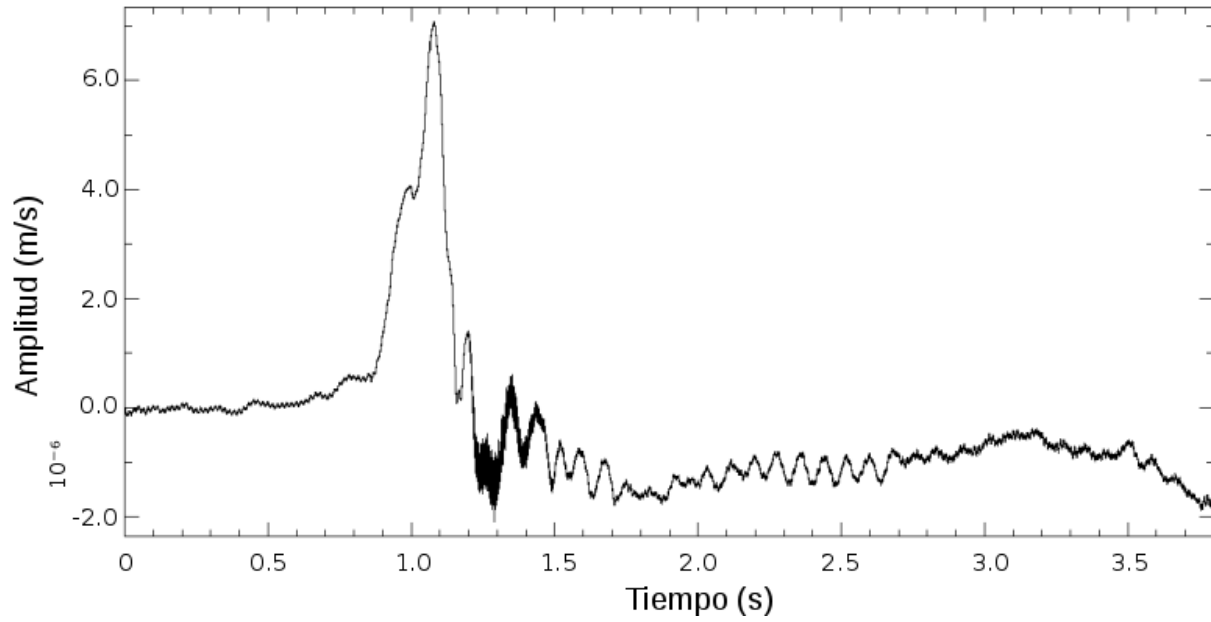


Figura 2.4. Señal obtenida con el sensor S03 en el experimento GMAA081116AIRA1 (Flujo de aire). La presión inicial en el conducto es de 3 atm, la tasa de muestreo es de 500000 Hz, el tiempo de registro es de 4 s, la densidad del fluido es de 1 kg/m³, la viscosidad es de 0.000001 Pa s.

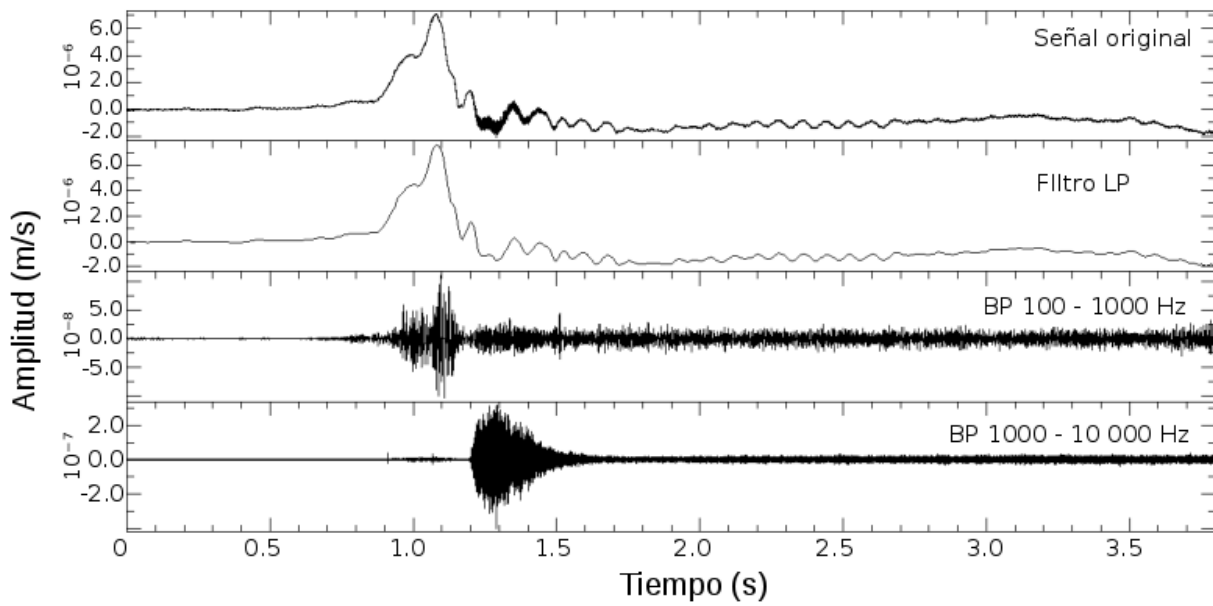


Figura 2.5. Efecto de los diferentes fluidos utilizados en la señal del receptor S03 del experimento GMAA081116AIRA1 (Flujo de aire). La presión inicial en el conducto es de 3 atm, la tasa de muestreo es de 500 000 Hz, el tiempo de registro es de 4 s, la densidad del fluido es de 1 kg/m³, la viscosidad es de 0.000001 Pa s.

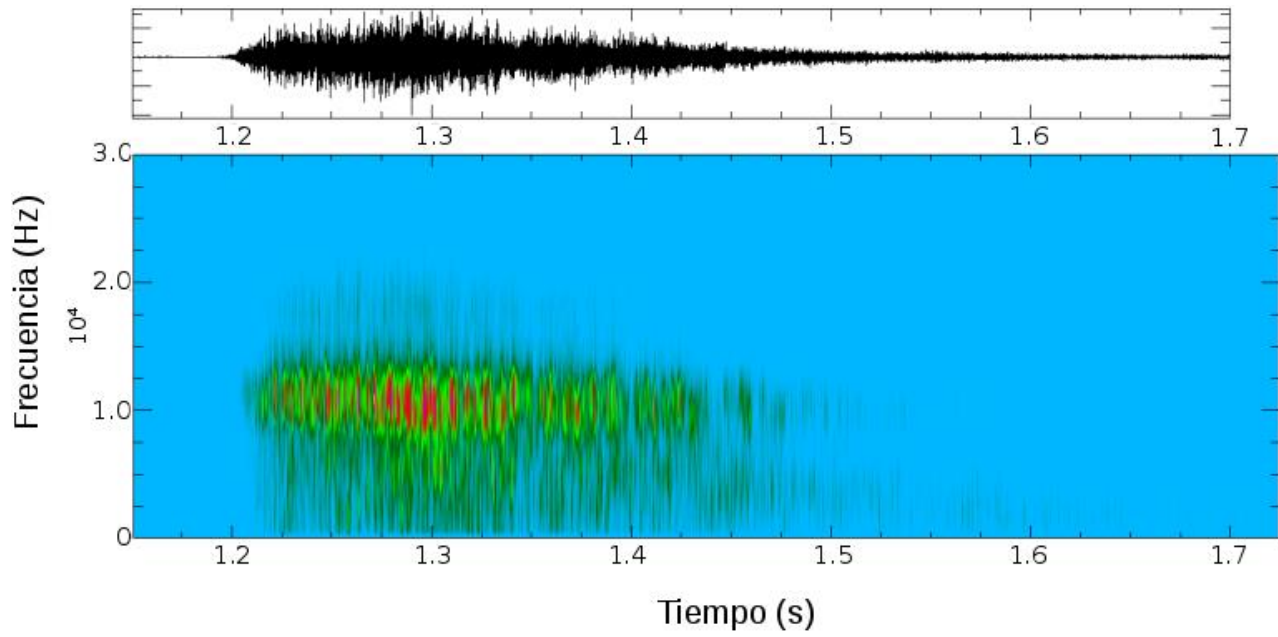


Figura 2.6. Espectrograma de la señal del receptor S03 del experimento GMAA081116AIRA1 (Flujo de Aire). El tamaño de la ventana de tiempo es de 0.001 s y el traslape entre ventanas es de 0.0001 s.

Capítulo 3. Descripción de Resultados

3.1 Caracterización del sistema experimental

Para estudiar la respuesta del sistema experimental al paso del flujo es necesario caracterizarlo previamente mediante un flujo de “prueba”, para esto se realizaron corridas experimentales utilizando sólo aire. La tabla 3.1 contiene los parámetros utilizados en estos experimentos: el más representativo de esta serie, descrito a continuación, es el experimento GMAA081116AIRA1. La presión de la válvula principal es de 3 atm (303 975 Pa) y el volumen de aire eyectado es de aproximadamente 2/3 de litro. El sensor más cercano a la válvula principal, considerada como la fuente, es S02. Realizando el procedimiento de tratamiento de las señales, descrito en la sección *Metodología*, se identificaron las siguientes componentes (ver Figura 3.1):

I. *Componente de baja frecuencia (LFC)*: La frecuencia dominante es de 4.2 Hz, el pico más prominente (amplitud máxima) está a 1.1 s; todos los sensores registran este pico cuya amplitud decrece con la distancia del sensor a la válvula dada por atenuación geométrica.

II. *Componente de frecuencia intermedia (MFC)*: Comprende, aproximadamente, entre 100 y 1000 Hz siendo la frecuencia dominante de 80 Hz. La duración de esta componente y la de baja frecuencia son similares (3.2 s). La amplitud de las oscilaciones cambia según el sensor, considera que la amplitud máxima de referencia es la registrada por el sensor S02 en 1.1 s. La amplitud del resto de la señal en el sensor S02 decrece en 80% hasta establecerse en una amplitud promedio de 20% con respecto a la amplitud máxima. Los demás sensores, cuyas amplitudes máximas son 85% más pequeñas que la amplitud de S02, decrecen hasta mantenerse en amplitudes iguales o menores a 10% de la amplitud máxima.

III. *Componente de alta frecuencia (HFC)*: Entre 1000 a 100 000 Hz, la frecuencia dominante es de 8000 Hz. Su duración es de 0.4 s, es decir, aproximadamente 10% de la duración total y se manifiesta 0.4 segundos después que las componentes anteriores, es decir, a los 1.2 s. Las amplitudes más prominentes pertenecen a S02; las demás amplitudes registradas en el resto de los sensores son 50% más nivel pequeñas que S02. El decaimiento de la amplitud de las oscilaciones es más prominente y se mantienen en un valor menor a 10% de la amplitud máxima.

En resumen, las frecuencias dominantes de los registros de flujo de aire son de 80 y 8000 Hz (ver figuras 3.3, 3.4); la primera corresponde a MFC y la segunda a HFC. La mayor parte de la energía contribuye en LFC, entonces el proceso de apertura y el de despresurización son los más energéticos en los experimentos. El segundo proceso energético del experimento se encuentra en HFC, luego se encuentra MFC que presenta el proceso de menor energía.

Velocidad de propagación

De las componentes mencionadas se calcularon las velocidades de propagación de las perturbaciones (ver figura 3.2) donde se muestran gráficas distancia – tiempo a partir de los tiempos de arribo de las perturbaciones. Las velocidades de propagación de las componentes se resumen en la Tabla 3.2. No en todos los experimentos se observan los tiempos de arribo; incluso en algunos donde se observan sólo se distinguen en apenas dos o tres sensores. Esto se puede deber a fallos técnicos inesperados en la instrumentación, por lo tanto la incertidumbre para determinar los tiempos de arribo es muy alta.

La velocidad de HFC es, en promedio, de 729.72 m/s mientras la velocidad de MFC es de 1275 m/s, siendo 1.75 veces más alta que HFC. La velocidad de propagación de la onda longitudinal en un sólido isótropo se puede estimar a través de la relación (Landau & Lifshitz, 1970)

$$c_l = \sqrt{\left(\frac{3K+4\mu}{3\rho}\right)} \quad (24)$$

donde K es el módulo de compresibilidad, μ es el módulo de rigidez y ρ es la densidad del sólido; considerando los valores de K y μ reportados por el fabricante para el tubo que sirve como sección de pruebas determinamos que la velocidad en el PVC es de 1551.61 m/s. La diferencia entre el valor estimado y el medido en los experimentos es del 18% (el valor promedio de velocidad de onda longitudinal para el PVC, reportado por varios fabricantes, es de 2400 m/s). El valor de la velocidad media de la onda de compresión depende de las características del material, y éstas pueden variar dependiendo del fabricante.

| Experimento | <i>GMAA081116AIRA1</i> | <i>GMAA150317H2OB8</i> | <i>GMAA210317GLYA4</i> |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Fluido | Aire | Agua | Glicerina |
| Po en sistema (Pa) | 3 | 3 | 1.5 |
| Volumen (m³) | 0.00067 | 0.775 | 0.53 |
| Viscosidad (Pa s) | 0.000001 | 0.001 | 1.3 |
| Densidad (Kg/m³) | 1 | 1000 | 1410 |
| Tasa muestreo (Hz) | 500000 | 500000 | 50000 |
| Duración (s) | 4 | 4 | 40 |

Tabla 3.1. Parámetros geométricos de los conductos y parámetros físicos de los fluidos utilizados durante la fase experimental.

Como el sistema responde en todos los anchos de banda, de ahí la importancia en la separación de la señal en diferentes componentes de frecuencia. La respuesta característica del sistema con flujo de aire en cada frecuencia, con presión inicial de 3 bar, es de 12, 80 y 8000 Hz, estas corresponden con cada una de las componentes mencionadas (*ver figuras 3.3, 3.4, 3.5*). El mecanismo de apertura corresponde a LFC donde la forma de onda puede variar dependiendo de la fuerza requerida y la rapidez para abrir la válvula. Todos los experimentos comparten el mismo mecanismo de activación de flujo y los parámetros geométricos del sistema son los mismos, entonces las variaciones de la respuesta en frecuencia y en tiempo dependen de los parámetros físicos de los fluidos.

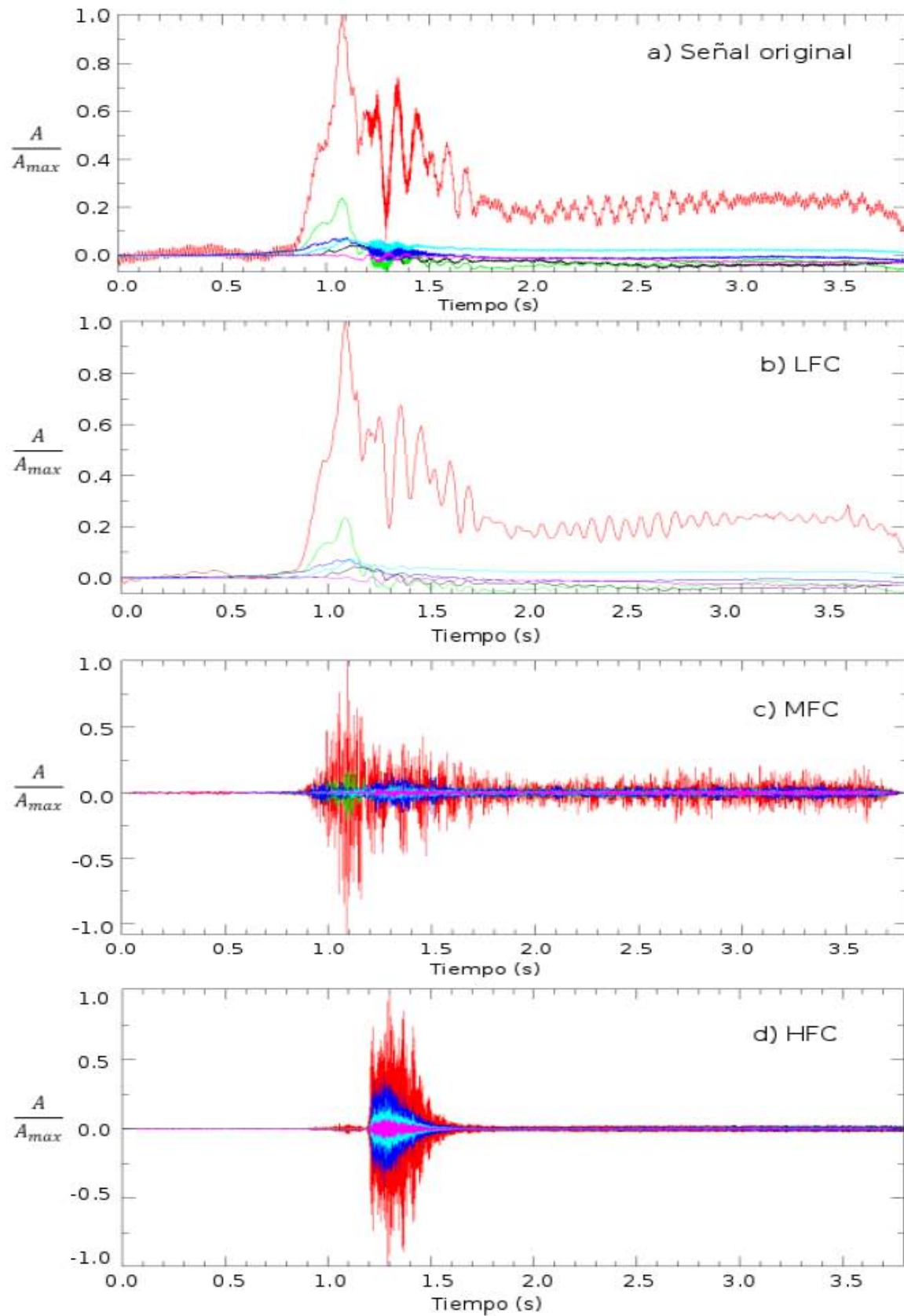


Figura 3.1 a) Señal sin procesar. b) Componente LFC de las señales experimentales de flujo de aire. c) Componente MFC de las señales experimentales de flujo de aire. d) Componente HFC de las señales experimentales de flujo de aire. Para obtener estas señales se usa filtro tipo Butterworth con dos polos: a) Pasa bajas con frecuencia de corte $f_c = 10$ Hz, b) pasa banda en $100 \text{ Hz} < f_c < 1000 \text{ Hz}$ y c) en $1000 \text{ Hz} < f_c < 10\ 000 \text{ Hz}$. La amplitud se normaliza con respecto a la máxima amplitud de cada componente.

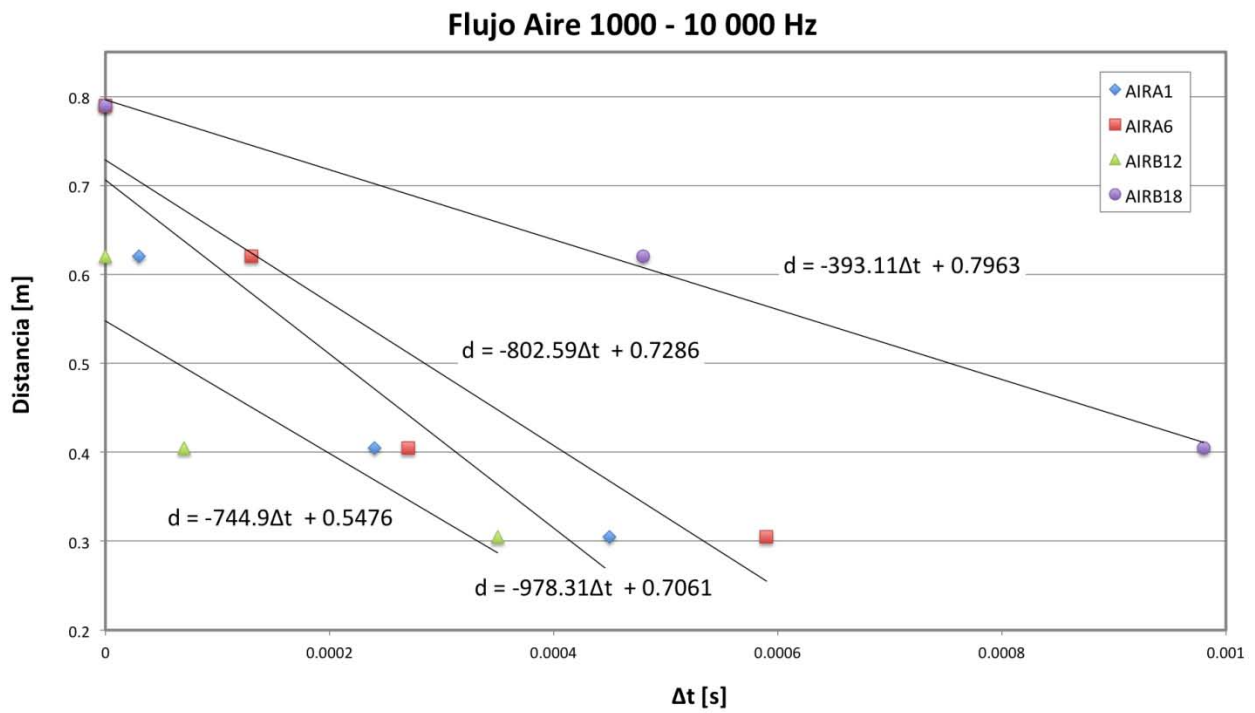
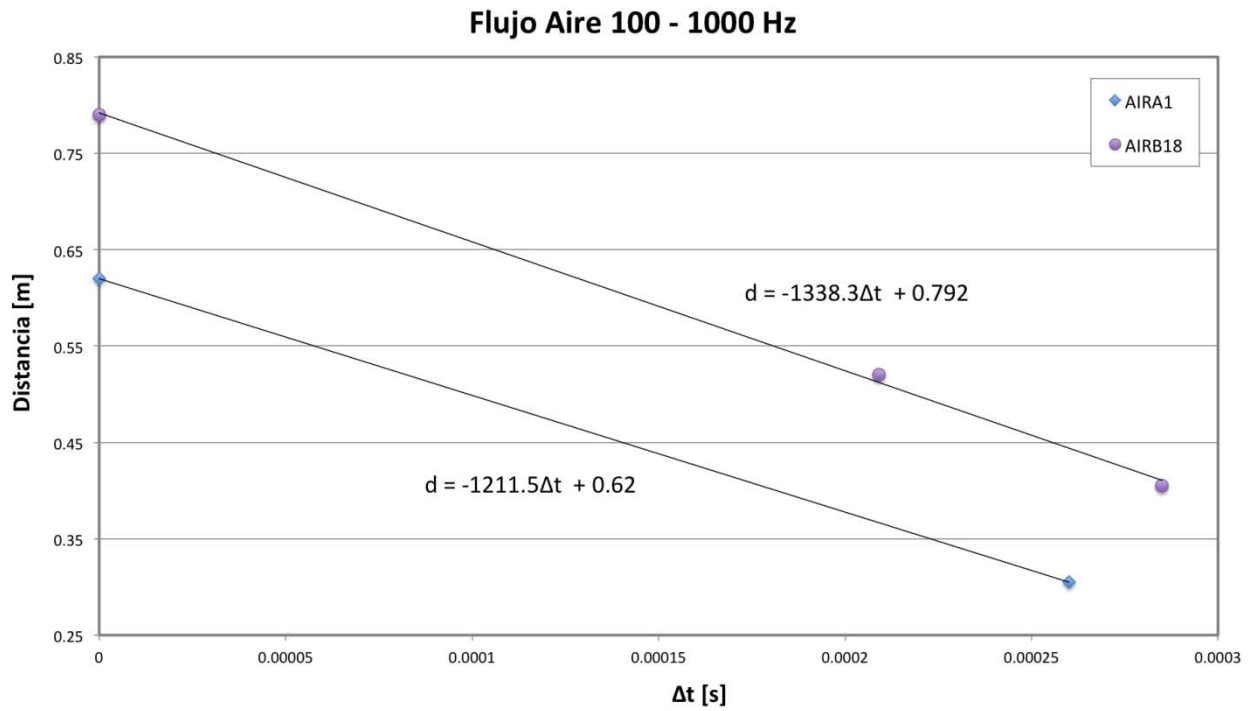


Figura 3.2. Gráficas tiempo – distancia de los primeros arribos tomados para las componentes del flujo de aire. La imagen superior corresponde a la componente MFC y la imagen inferior corresponde a la componente HFC. En las ecuaciones de cada gráfica, $d = A\Delta t + B$, el valor de A corresponde a la velocidad promedio estimada para cada experimento (la velocidad es el valor absoluto de A).

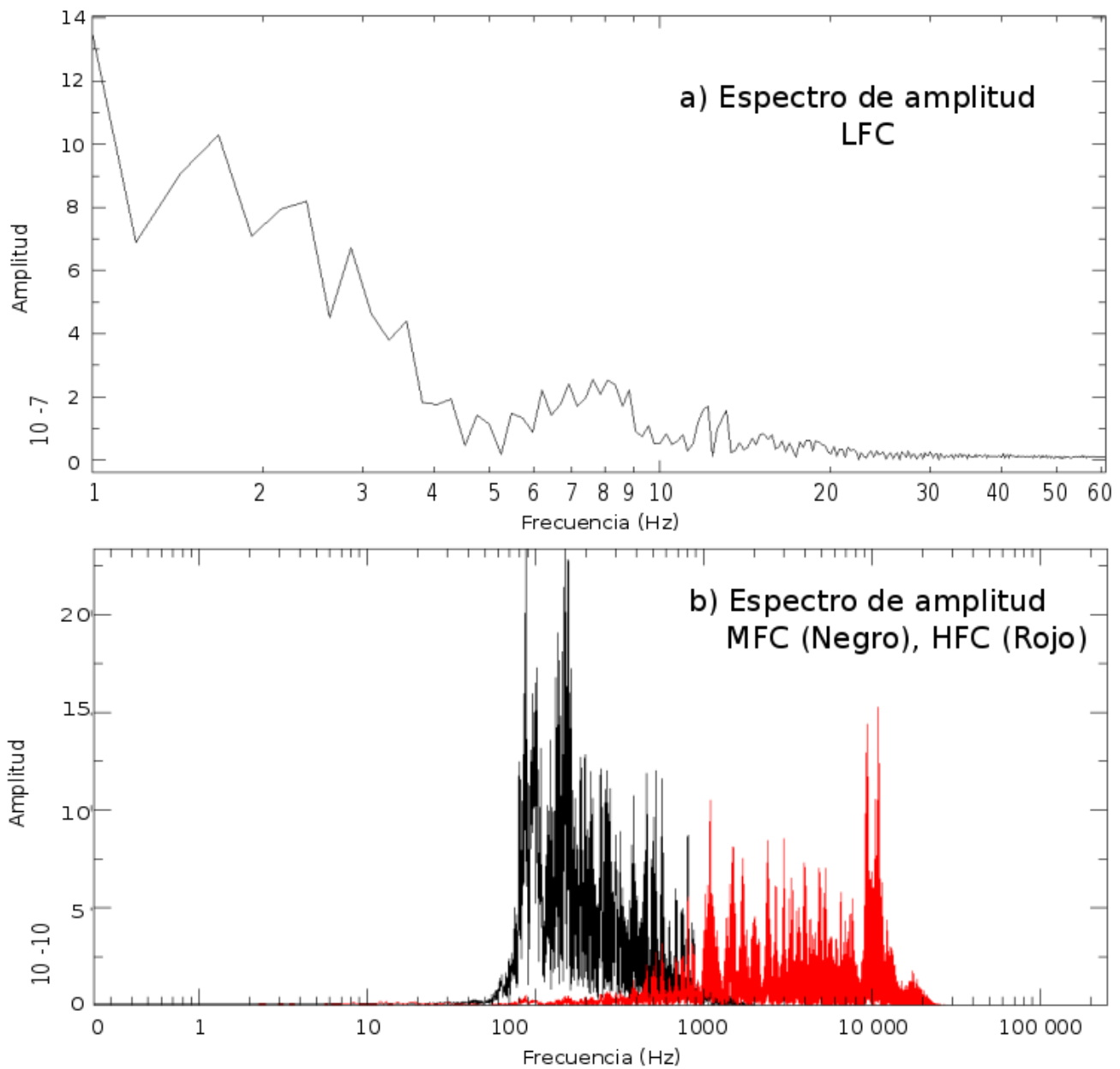


Figura 3.3. Espectro de amplitud de las componentes a) LFC, b) MFC (Negro) y HFC (Rojo) . El cálculo de los espectros de amplitud se realizó a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). El tamaño de ventana utilizado es de 0.000002 s a 250,000 puntos.

3.2 Respuesta del sistema a flujos de diferentes características

3.2.1 Experimentos con flujo de agua

Los parámetros para este tipo de experimentos se muestran en la Tabla 3.1. La forma de onda de LFC, entre 0.8 s y 1.15 s, se asemeja a la forma de onda de LFC del flujo de aire (ver Figuras 3.1, 3.6); En MFC se observan pulsos en los intervalos de 0.8 – 1.15 s y 1.2 – 1.5 s. Sus amplitudes son

de 50% y 40% respectivamente, en comparación con la amplitud máxima del canal S02. La amplitud de la señal decae a partir de 1.5 s, y posteriormente aumenta hasta alcanzar una amplitud promedio de 20% con respecto a la máxima amplitud; esta amplitud se mantiene durante el resto del registro. En HFC se observa un pulso de amplitud prominente en S02 a 1.05 s y se atenúa 0.1 s después; las amplitudes del primer pulso son de 25% con respecto a la máxima. Posteriormente una segunda señal inicia a 1.25 s, 0.1 s después, con amplitud promedio de 25% con respecto a la amplitud máxima (*ver Figura 3.6*). Las frecuencias dominantes están por debajo de los 2000 Hz: En MFC es de 150 Hz y en HFC es de 1400 Hz. La respuesta en frecuencia muestra un cambio con respecto a MFC y HFC del flujo de aire, que puede relacionarse con las propiedades físicas del fluido (*ver Figuras 3.3, 3.4, 3.7, 3.8*). La velocidad promedio de propagación de la MFC es aproximadamente de 1314.23 m/s, con una diferencia del 16% con respecto al valor calculado teóricamente.

La velocidad promedio para la HFC es de 562.45 m/s, siendo 2.75 más pequeña que el valor teórico (*ver figura 3.5*). LFC es la componente más energética de la señal, mientras que HFC es la componente que menos energía presenta (*ver Figura 3.8*).

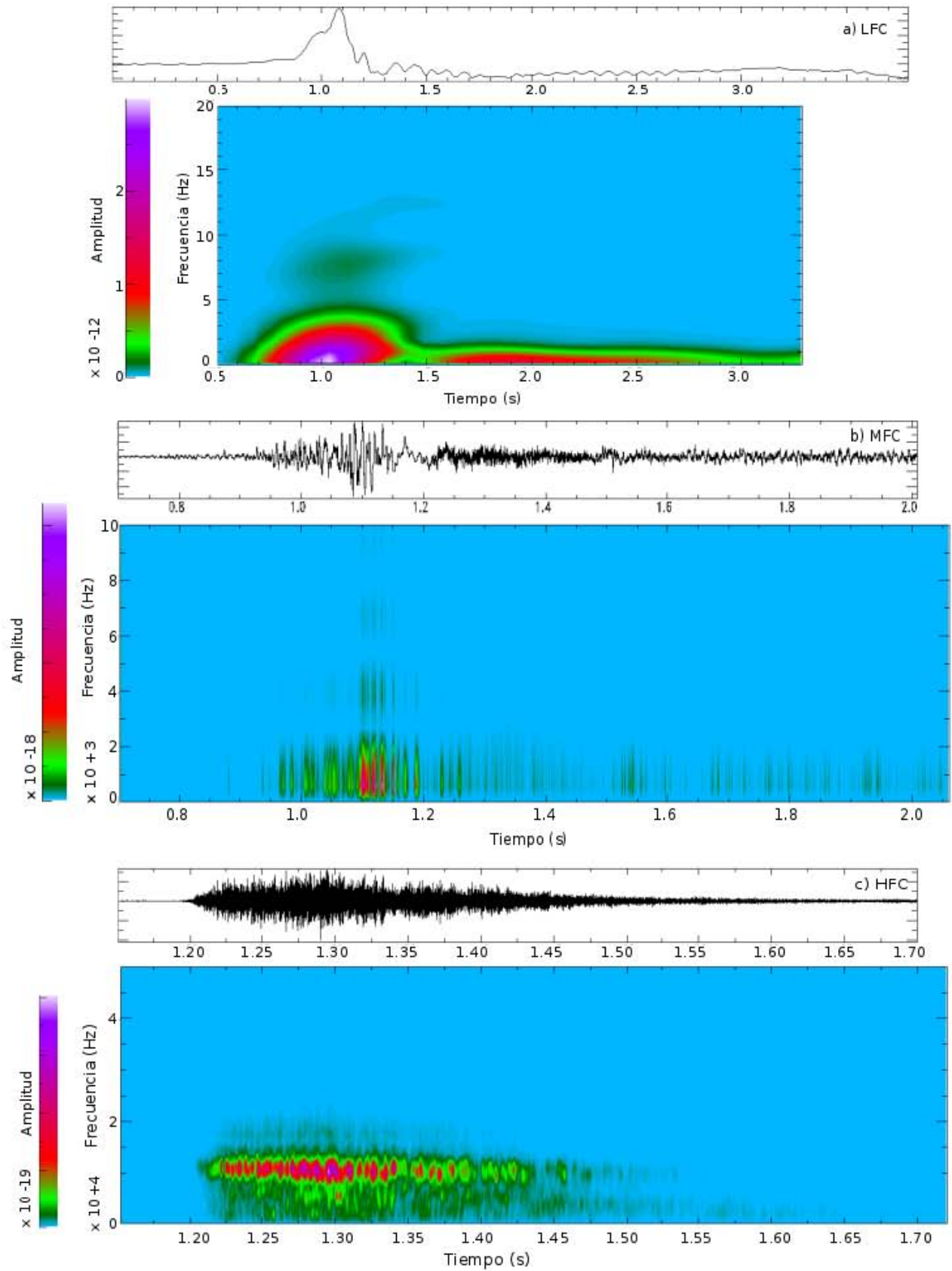


Figura 3.4 Espectrogramas calculados de la señal del canal S03 de flujo de aire para a) LFC, b) MFC y c) HFC. El método utilizado es por Densidad Espectral de Potencia (PDS). El tamaño de ventana es de 0.004 s y el traslape entre ventanas es cada 0.0001 s.

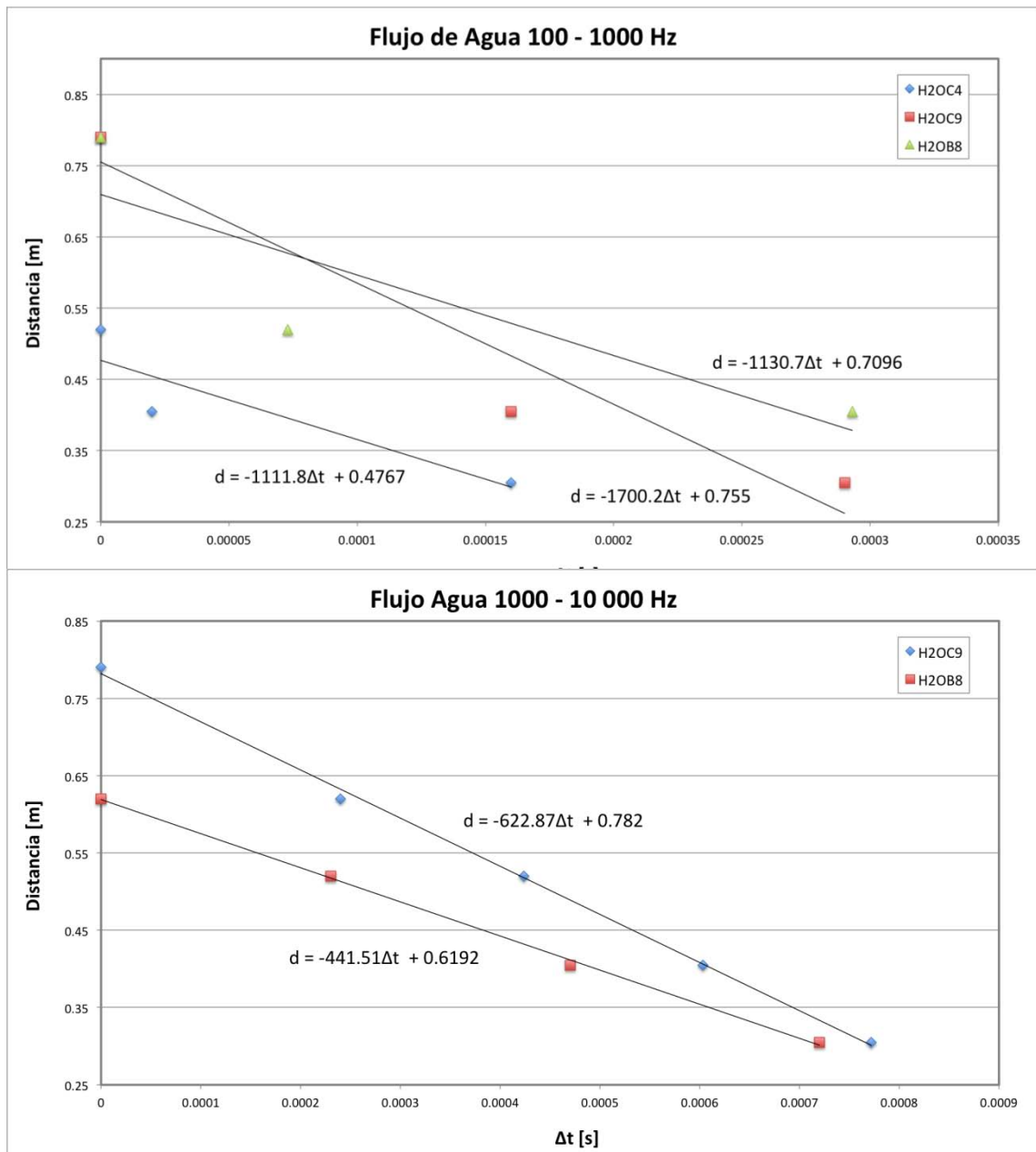


Figura 3.5 Graficas tiempo – distancia de los primeros arribos tomados para las componentes del flujo de agua. La imagen superior corresponde a la componente MFC y la imagen inferior corresponde a la componente HFC. En las ecuaciones de cada gráfica, $d = A\Delta t + B$, el valor de A corresponde a la velocidad promedio estimada para cada experimento (la velocidad es el valor absoluto de A).

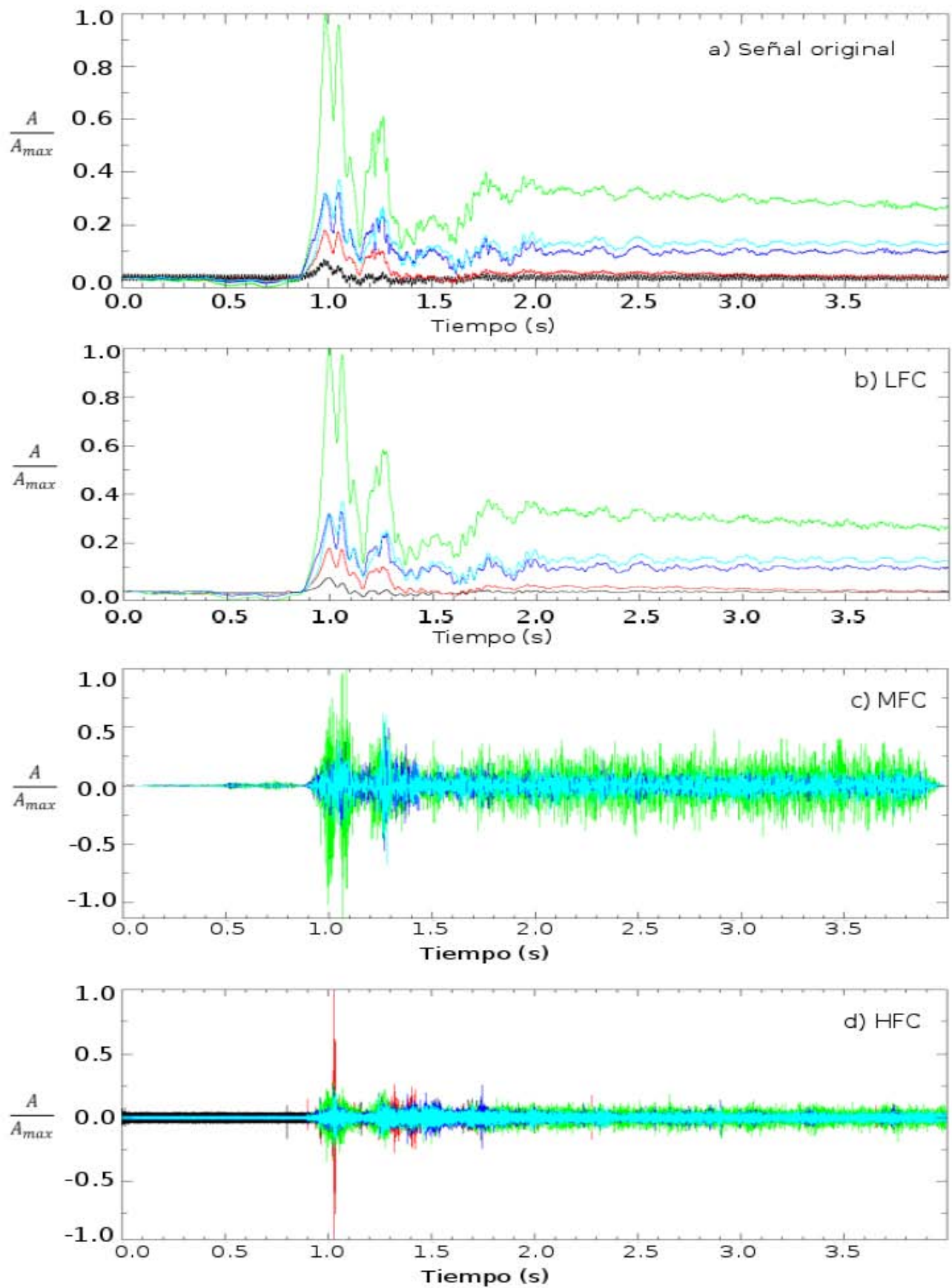


Figura 3.6 a) Señales originales registradas por los sensores para flujo de agua; la tasa de muestreo es de 500 000 Hz. b) Componente LFC de la señal experimental obtenida usando un filtro pasa bajas con $f_c = 100$ Hz. c) Componente MFC de las señales experimentales obtenidas usando un filtro pasa bandas en $100 \text{ Hz} < F_c < 1000$ Hz. d) Componente HFC de las señales experimentales obtenidas usando un filtro pasa banda en $1000 \text{ Hz} < F_c < 10000$ Hz.

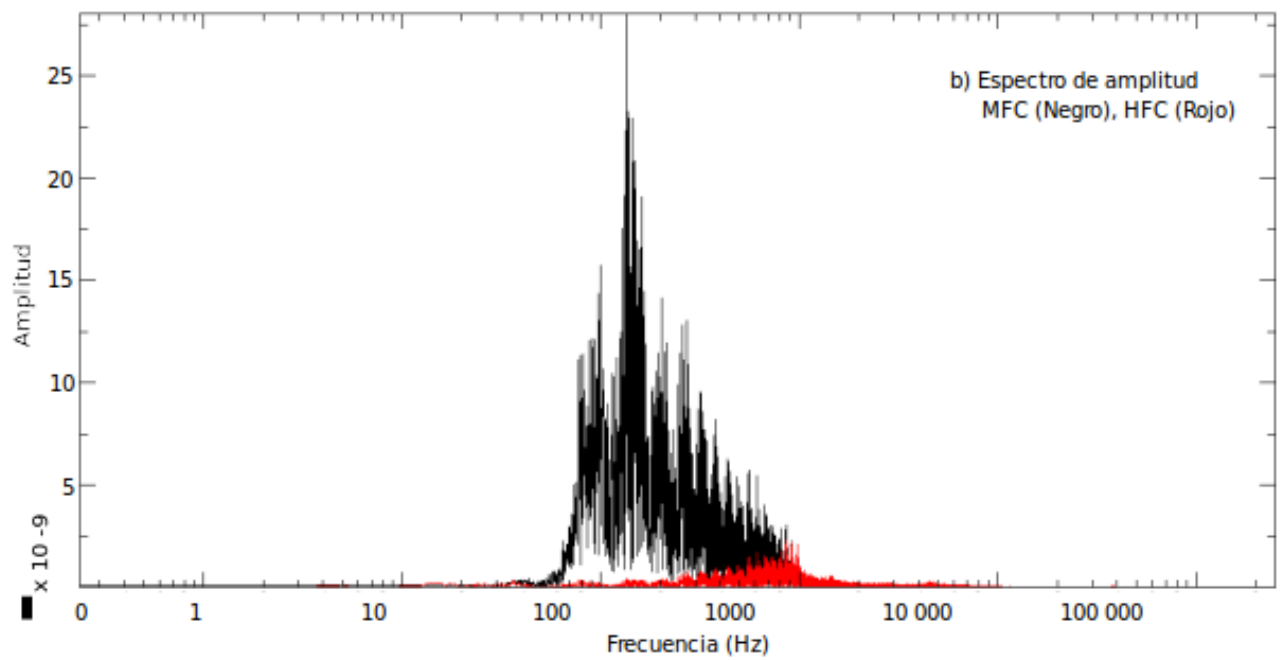
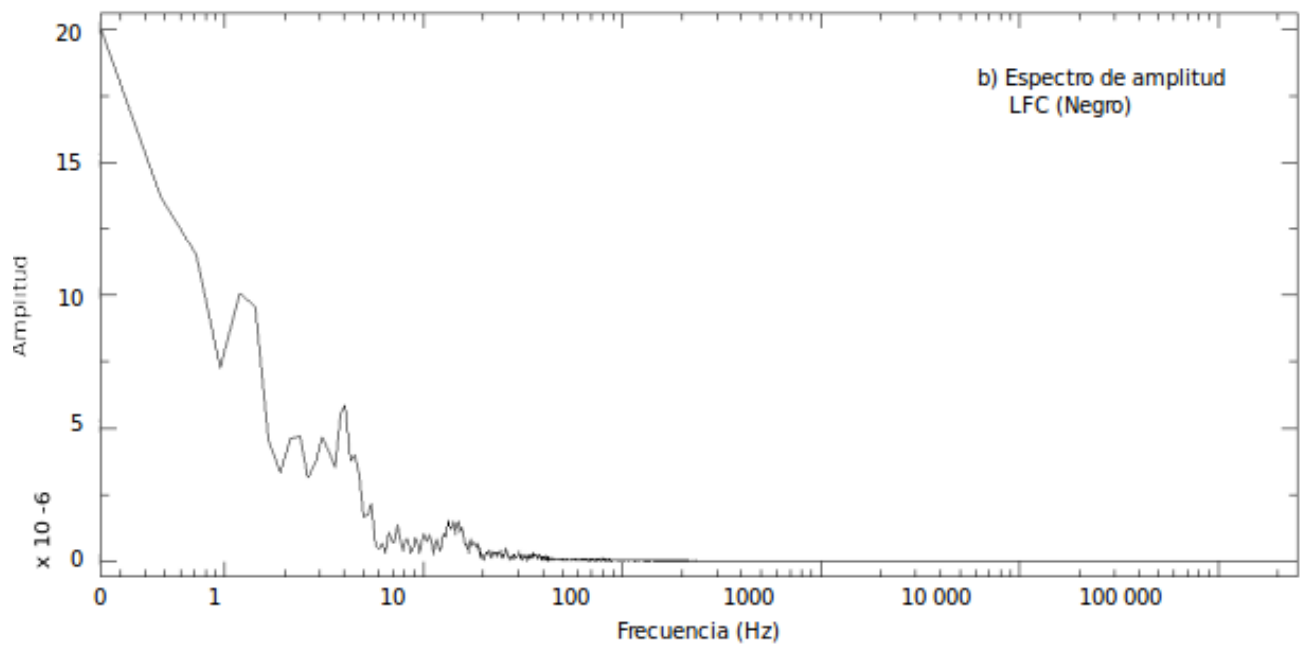


Figura 3.7. Espectro de amplitud de las componentes para flujo de agua: a) LFC y b) MFC (Negro) y HFC (Rojo). El cálculo de los espectros de amplitud se realizó usando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). El tamaño de ventana utilizado es de 0.000002 s con 250 000 puntos.

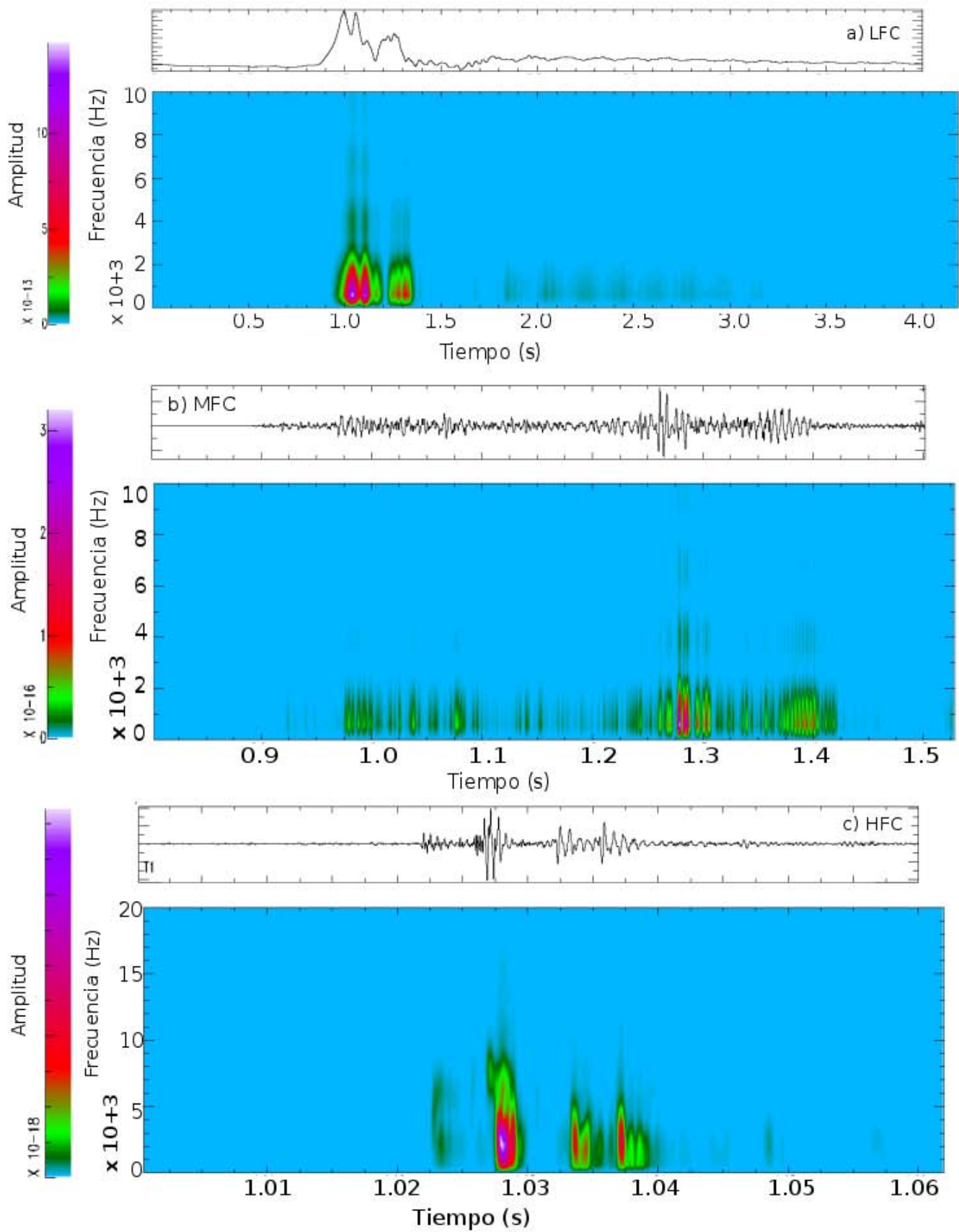


Figura 3.8 Espectrogramas calculados de las componentes a) LFC, b) MFC y c) HFC, extraídas del registro del sensor S03 para flujo de agua. El método utilizado es Densidad Espectral de Potencia (PDS). El tamaño de ventana es de 0.001 s y el traslape entre ventanas es cada 0.0001 s.

3.2.2 Experimentos con glicerina

En estos experimentos se redujo la tasa de muestreo a 50 000 Hz, es decir, un orden de magnitud con respecto a los experimentos con aire (*ver sección 3.1*) y con agua (*ver sección 3.2.1*). Como el número de muestras es el mismo, entonces la duración de la señal se incrementó a 40 s. En este caso se trata de un fluido cuya viscosidad es 1000 veces mayor a la del agua. Esto asegura que existe un flujo de glicerina con una presión inicial de 1.5 bar (152 062.5 Pa) (*ver Tabla 3.1*). En ciertas ocasiones el mal acoplamiento de los sensores al conducto no permite la estabilización de la señal en un valor determinado; por ejemplo, la componente LFC del sensor S04 (*ver figura 3.9a*). La componente LFC comienza a los 8 s con amplitudes de aproximadamente 80% con respecto a la amplitud máxima (registrada en el canal S04). Estas amplitudes decrecen durante 7 s hasta regresar al nivel promedio de la señal registrada (*ver figura 3.9a*). En MFC y HFC se observan dos tipos de señales: un primer pulso a 8.1 s con 1 s de duración, y una segunda señal de 3.5 s de duración cuya amplitud se mantiene constante y que es menor con respecto al primer pulso (*ver figura 3.9 c*). A partir de los 100 Hz se muestra una característica inusual de la señal que consiste de un pulso de 0.25 s de duración previo a la excitación del sensor por la apertura del sistema. Las velocidades en MFC y HFC son de 93.22 m/s y 75.92 m/s respectivamente; debido al exceso de ruido eléctrico en algunos canales sólo se estimaron los tiempos de arribo en dos o tres sensores (*ver figura 3.8*). Las frecuencias dominantes de cada componente, de acuerdo con los espectrogramas y los espectros de amplitud calculados, son de 1 Hz para LFC, 20 Hz para MFC y 80 Hz para HFC. El sistema está dominado por la componente LFC y, tanto MFC como HFC presentan la misma forma de onda (*ver figuras 3.9a*).

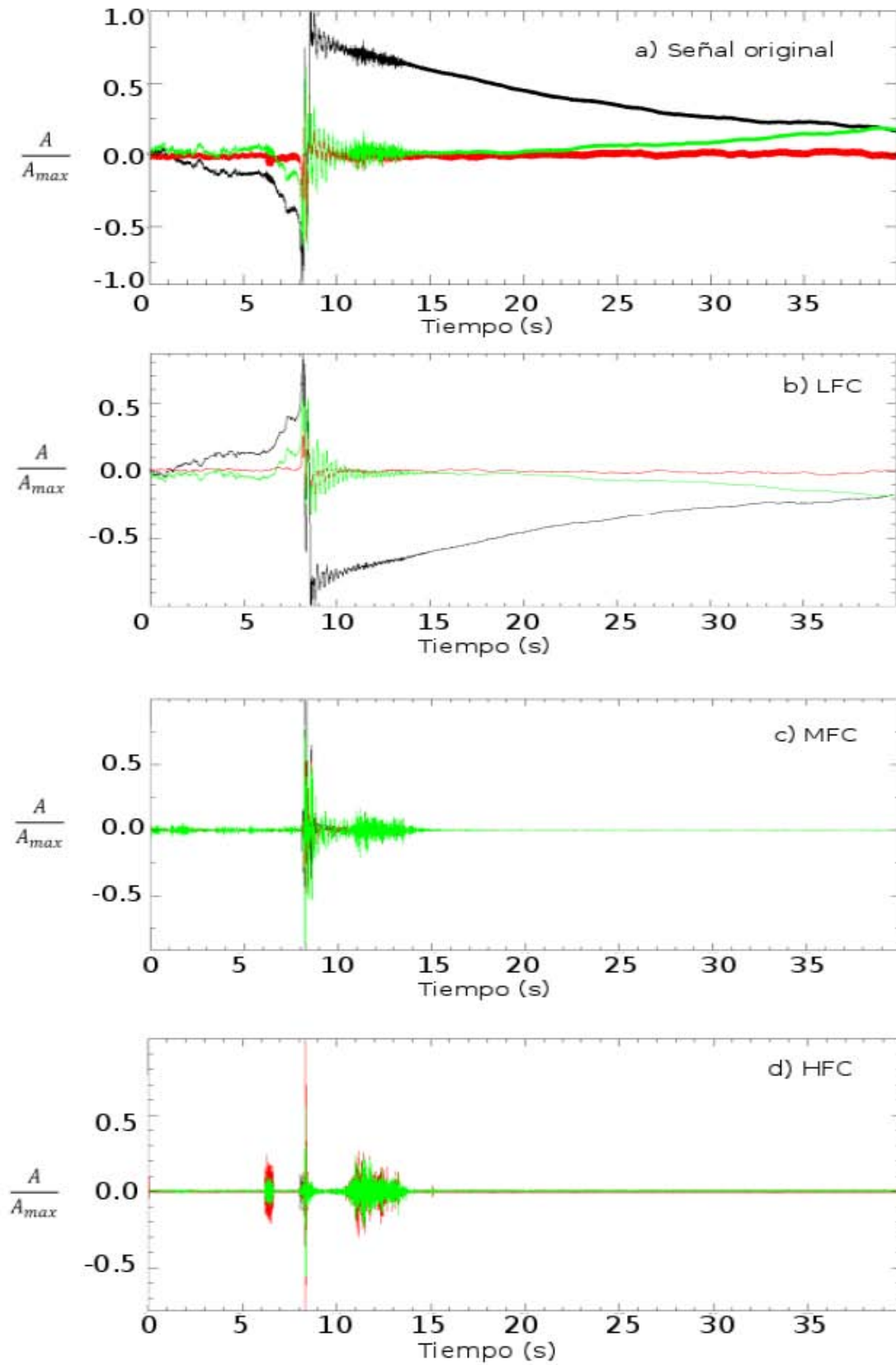


Figura 3.9 a) Señales originales registradas por los sensores para flujo de glicerina; la tasa de muestreo es de 50 000 Hz. b) Componente LFC de la señal experimental obtenida usando un filtro pasa bajas con $f_c = 10$ Hz. c) Componente MFC de las señales experimentales obtenidas usando un filtro pasa bandas en $10 \text{ Hz} < F_c < 100 \text{ Hz}$. d) Componente HFC de las señales experimentales obtenidas usando un filtro pasa banda en $100 \text{ Hz} < F_c < 1000 \text{ Hz}$.

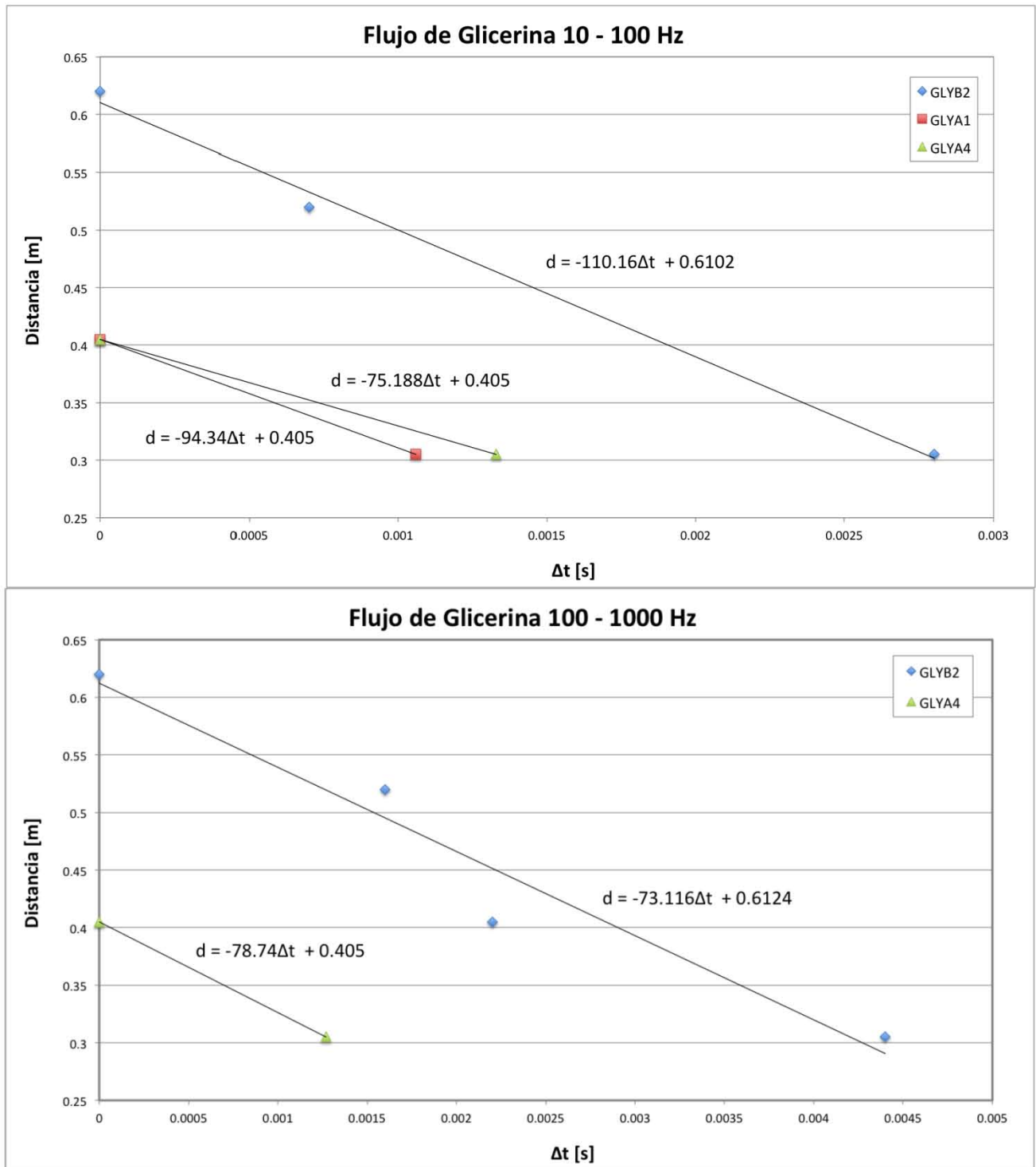


Figura 3.10 Graficas tiempo – distancia de los primeros arribos tomados para las componentes del flujo de glicerina. La imagen superior corresponde a la componente MFC y la imagen inferior corresponde a la componente HFC. En las ecuaciones de cada gráfica, $d = A\Delta t + B$, el valor de A corresponde a la velocidad promedio estimada para cada experimento (la velocidad es el valor absoluto de A).

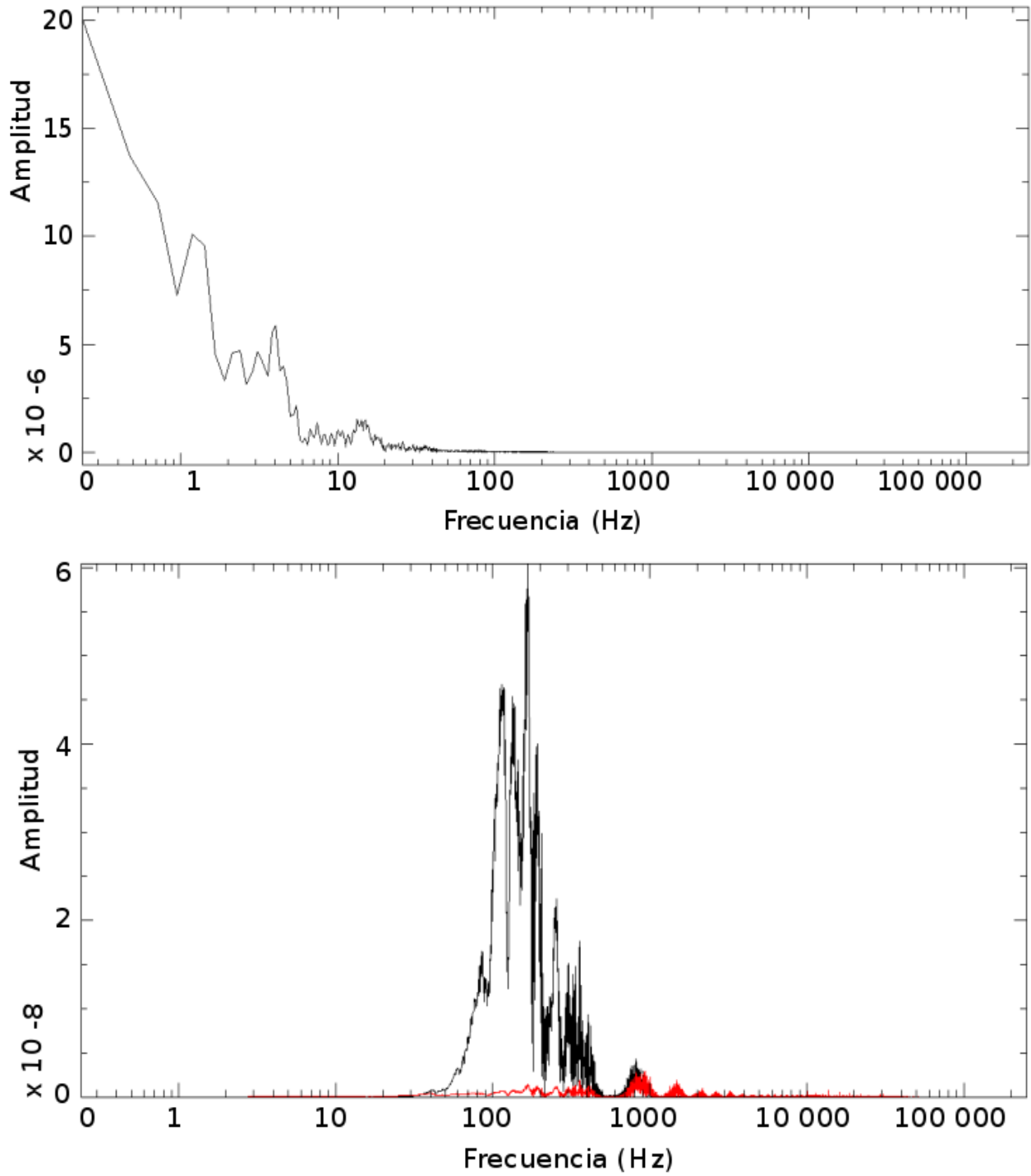


Figura 3.11. Espectros de amplitud de las componentes a) LFC Y b) MFC (Negro), HFC (Rojo) extraídas de las señales de flujo de glicerina. Se utilizó la Transformada Rápida de Fourier para calcularlos, con 0.000002 s en intervalo de tiempo y con 25 000 puntos.

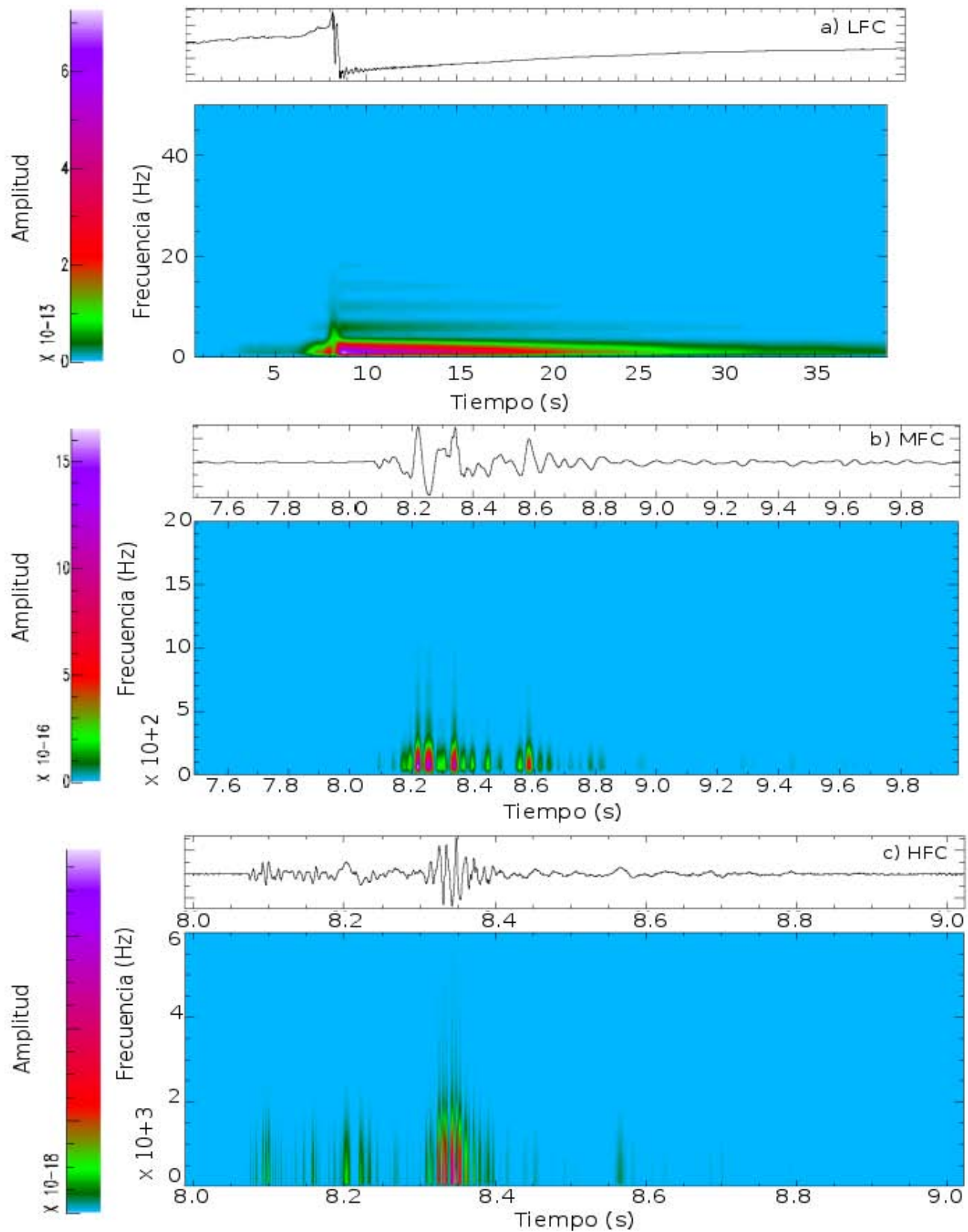


Figura 3.12. Espectrogramas de las componentes a) LFC, b) MFC y c) HFC extraídas de las señales de flujo de glicerina. El método utilizado para calcular los espectrogramas es Densidad Espectral de Potencia (PDS), el tamaño de ventana es de 0.001 s y el traslape entre ventanas es de 0.0001 s.

3.2.3 Sincronización Señal - Tiempo

Determinar la relación de las formas de onda y la frecuencia con los procesos que se desarrollan dentro de la tubería es un proceso complicado si no se tiene conocimiento de tales procesos. Por ello se hace uso de herramientas auxiliares que nos permitan observar a detalle el desarrollo del flujo en la tubería. Para ello se realizó el registro simultáneo de las señales experimentales y de videos utilizando una cámara de ultra alta velocidad Phantom. En general, los procesos que se observaron dentro de la sección de pruebas en los experimentos con agua y glicerina (según la secuencia de activación) fueron los siguientes:

- a) Al activar se abre la válvula principal que despresuriza el sistema (*ver Figura 3.13a, 3.14a*).
- b) En los primeros instantes del experimento se desarrolla flujo dentro de la tubería (*ver Figuras 3.13b, 3.14b*). Debido a que el sistema experimental fue presurizado con aire pueden existir pequeñas burbujas dentro del flujo, cuyo desplazamiento indica el movimiento del fluido.
- c) Conforme avanza el tiempo la columna inicial de fluido es desplazada y eyectada del sistema. Tanto la presión de salida como el aire inyectado provocan cambios en el flujo; es decir, en cierto momento del experimento el flujo pasa de ser laminar a turbulento. Se observa la penetración del flujo de aire a través de la columna de fluido (*ver Figuras 3.13c, 3.14c*).
- d) Flujo bifásico (fluido – aire) domina en toda la sección de pruebas. En su mayoría es flujo de aire inyectado con rasgos del fluido utilizado, ya sea agua o glicerina. En el registro de video se observan pulsos de aire procedentes del compresor que pasan a través de la sección de pruebas. El fluido remanente resbala por las paredes de la tubería (*ver Figuras 3.13d, 3.14d*).

A partir de los registros de video se puede estimar las velocidades promedio de flujo: el flujo de agua se desplaza a 5.63 m/s, mientras que el flujo de glicerina se desplaza a 0.44 m/s. El agua se mueve 12.8 veces más rápido que la glicerina debido a la viscosidad del fluido, y a la presión inicial de cada experimento.

En los experimentos toman lugar diferentes fuerzas que contribuyen a la dinámica dentro del sistema. Determinar el predominio de alguna de estas fuerzas sobre el sistema requiere del conocimiento de ciertos parámetros adimensionales que establecen la relación entre dichas fuerzas. Aunque la importancia de éstos se encuentra en burbujas de gas, en sistemas magmáticos de baja viscosidad también ayudan a obtener una estimación del balance de fuerzas en el sistema (James et al., 2006). Estos parámetros son los siguientes:

Número de Reynolds: Relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas de viscosidad,

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (25)$$

Número de Froude: Relaciona las fuerzas inerciales con la fuerza de gravedad,

$$F_r = \frac{U_0}{\sqrt{g D}} \quad (26)$$

Número de Morton: Proporciona el balance entre las fuerzas viscosas y la tensión superficial,

$$M_o = \frac{g \mu^4}{\rho \sigma^3} \quad (27)$$

Número de Eötvös: Da un el balance entre la gravedad y la tensión superficial

$$E_o = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (28)$$

donde U_0 es la velocidad del trazador, g es la aceleración de la gravedad, D es el diámetro del conducto, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad del fluido, V es la velocidad media del flujo y σ es el valor de la tensión superficial.

Como se mencionó, el número de Froude es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales sobre un elemento del fluido con el peso del elemento. Éste se aplica generalmente a flujos con superficie libre (Munson et al., 2004; James et al., 2006). Si $Fr > 1$ entonces el flujo se considera supercrítico (el flujo se mueve muy rápido y las fuerzas inerciales son mayores que las fuerzas gravitacionales); si $Fr < 1$ entonces el flujo es subcrítico (el flujo es muy lento y las fuerzas

gravitacionales son mayores a las fuerzas inerciales) y si $Fr = 1$ entonces el flujo se considera *crítico* (la velocidad de las ondas superficiales es la misma que la velocidad del flujo). En el caso de los números de Morton y Eötvös, que relacionan las fuerzas viscosas e inerciales con la tensión superficial se tiene que: si son mayores a 1 en el sistema predominan las fuerzas inerciales y viscosas; si son menores a 1 entonces la tensión superficial domina en el sistema; si son iguales a 1 entonces hay un equilibrio en ambas fuerzas. En el caso del número de Reynolds, parámetro adimensional que determina la naturaleza del flujo, si $Re < 2100$ entonces el flujo es laminar, si $Re > 4000$ entonces el flujo es turbulento y si $2100 < Re < 4000$ el flujo está en transición de laminar a turbulento (Munson et al., 2002).

El valor de la tensión superficial promedio para agua y glicerina es de 72.75×10^{-3} N/m (Vargaftik et al., 1993) y 63.4×10^{-3} N/m (Glycerine Producers' Association, 1963), respectivamente. Tomando estos valores en cuenta y los parámetros experimentales (ver tabla 3.1) se calcularon los números de Froude, Morton y Eötvös. Los resultados son los siguientes: en el sistema experimental para el flujo de agua $Re = 140\,750$, $Fr = 12.72$, $Mo = 2.6 \times 10^{-11}$ y $Eo = 85.06$; para glicerina $Re = 10.66$, $Fr = 0.98$, $Mo = 77.89$ y $Eo = 136.21$.

Con los valores calculados y las imágenes de video se determinó que en los experimentos con flujo de agua las fuerzas inerciales y de tensión superficial son mucho mayores que las fuerzas de viscosidad, además de que el flujo contrarresta las fuerzas gravitacionales ($Fr \gg 1$), el número de Reynolds es mucho mayor que el límite, por lo tanto es un flujo turbulento. En los experimentos con glicerina sucede lo opuesto, es decir, las fuerzas viscosas son predominantes sobre las fuerzas inerciales y de tensión superficial. Fr , en este caso, es cercano a 1 y el sistema está cerca del equilibrio entre la inercia del flujo y la gravedad; además de que el flujo de glicerina es *crítico*.

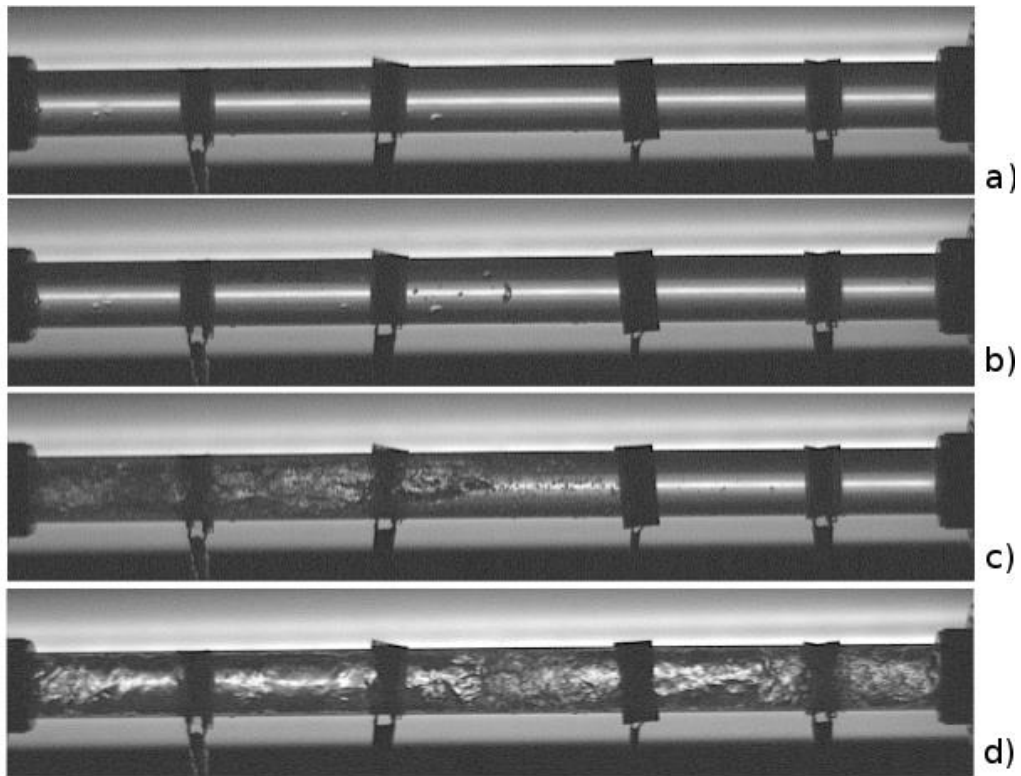


Figura 3.13. Secuencia de instantáneas tomadas del registro de video de los experimentos para flujo de agua. Los videos fueron tomados con una velocidad de 10 000 fps a una resolución de 1280 x 780 cuadros. a) Estado del tubo justo en la fase de despresurización, b) Flujo de agua por despresurización, c) Transición fase monofásica– bifásica por invasión de la columna de aire en la columna de agua, d) Fase turbulenta del flujo en mezcla agua – aire.

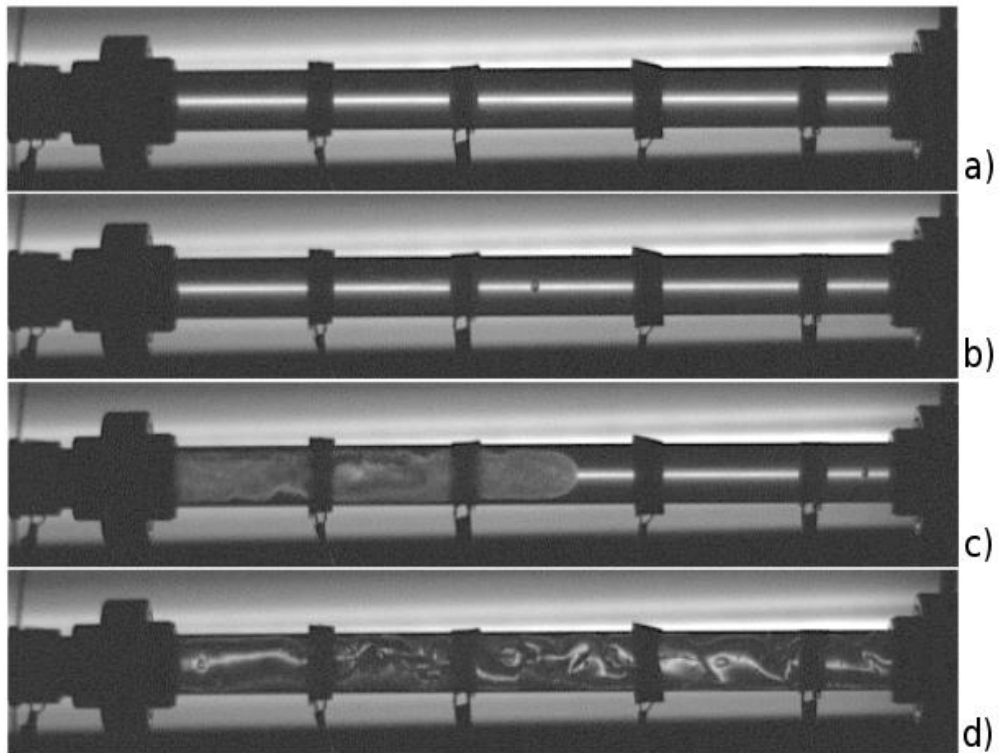


Figura 3.14. Secuencia de instantáneas tomadas del registro de video de los experimentos para flujo de glicerina. Los videos fueron tomados con una velocidad de 1000 fps a una resolución de 1280 x 780. a) Estado del tubo justo en la fase de despresurización, b) Flujo de glicerina por despresurización, c) Aparición de slugs por invasión de la columna de aire en la columna de agua, d) Flujo agitado por mezcla glicerina – aire.

Los experimentos con agua tienen un grado de complejidad más alto que los experimentos con glicerina debido al gran contenido de frecuencias que presenta la señal. Esto en parte tiene que ver con la naturaleza turbulenta del flujo en los experimentos. Sin embargo, al observar simultáneamente los registros de video con las señales experimentales, se distinguen tres tipos de comportamientos que corresponden a tres procesos:

- La primera parte se presenta justo después de la apertura de la válvula principal, de 0.8 a 1.15 s. Las tres componentes registran oscilaciones que pueden reflejar la perturbación del sistema debido a la despresurización. En la tubería, aparentemente, no se observa movimiento perceptible del fluido (ver Figuras 3.15 panel superior, 3.18 panel superior).

- La segunda parte, que abarca de 1.15 s a 1.4 s aproximadamente, se observa que ya hay flujo dentro de la tubería. Esto se detecta a través del movimiento de pequeñas burbujas que salen de la parte inferior de la tubería. Esto coincide con un aumento en la amplitud en las componentes; tal aumento varía dependiendo de la posición del sensor con respecto a la fuente (ver Figuras 3.15 panel inferior, 3.16 panel superior, 3.18 panel superior).

- La tercera parte corresponde con la transición de flujo laminar a flujo turbulento. El flujo turbulento a partir de 1.4 s. En MFC es más notorio el cambio al aumentar nuevamente las amplitudes y permanecer en un valor promedio. En HFC la frecuencia cambia y se pueden apreciar pequeños cambios en la amplitud durante ciertos momentos. En LFC hay un aumento de la amplitud y la aparición de una segunda señal de frecuencia más alta, cuya amplitud se va atenuando aunque persiste durante el resto del experimento (ver Figura 3.16 panel inferior, 3.18 panel inferior, 3.19).

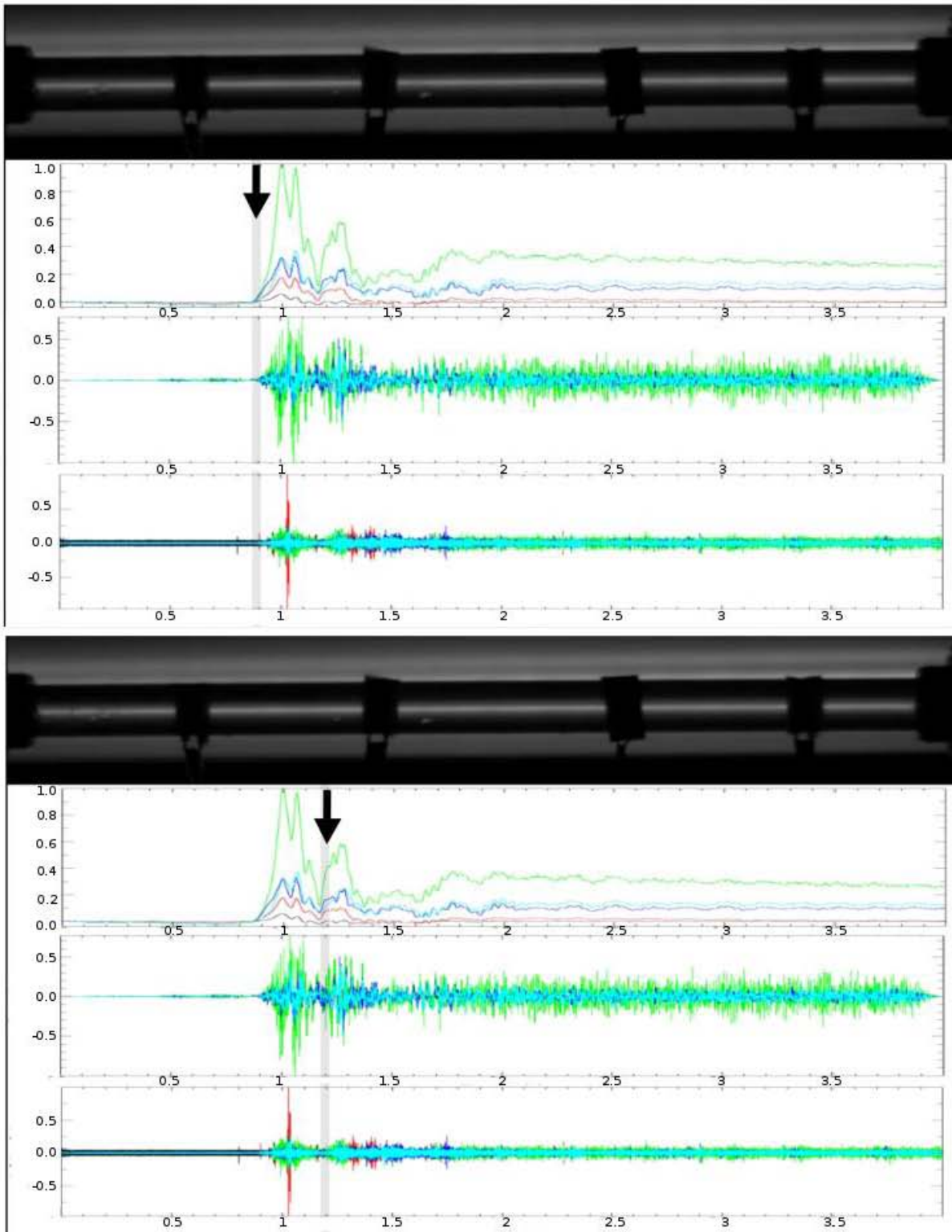
Los experimentos con glicerina, son un poco más sencillos debido a la evolución gradual del proceso. Su menor contenido de frecuencias y la forma de la onda se deben a que el flujo es laminar. Se puede observar también tres procesos:

1.- La primera parte está relacionado con un pulso en HFC localizado justo antes de la apertura de la válvula, entre los 6 y 7 s. Éste coincide con el encendido en la iluminación del experimento por lo que esta respuesta es ruido eléctrico (ver figura 3.18 panel superior).

2.- La segunda parte se relaciona con el proceso de la apertura de la válvula y el desarrollo del flujo laminar. Este proceso toma 2.5 s, a partir de los 8 s que es cuando se abre la válvula, y se caracteriza por presentar las amplitudes máximas en las tres componentes. El trayecto de dos

pequeñas burbujas que aparecen en el registro indica que el fluido se encuentra en movimiento (*ver figura 3.15, 3.16, 3.18*).

3- La tercera y última parte está relacionada con un proceso similar al que ocurre con los experimentos con agua: el desplazamiento inicial de la columna de fluido y la penetración de flujo de aire en la sección de pruebas. En este caso se desarrollan *slugs* de aire dentro del flujo de glicerina. Su desarrollo está relacionado con tres factores importantes: la viscosidad (10^3 mayor que el agua) y la presión inicial (la mitad de la presión inicial usada con los experimentos de agua). Junto a este proceso aparece una segunda señal de amplitud sostenida durante 4 s, tanto en MFC como HFC asociada a la turbulencia en el flujo por el ingreso del aire en el sistema. Posteriormente el sistema se estabiliza y no aparece algún efecto posterior en este experimento (*ver figuras 3.17, 3.19*).



Eje ordenadas - Amplitud normalizada
Eje abscisas - Tiempo (s)

Figura 3.15. Secuencia de instantáneas tomadas del registro de video de los experimentos sincronizado con las señales para flujo de agua. Los videos fueron tomados con una velocidad de 10 000 fps a una resolución de 1280 x 780 cuadros. La imagen superior corresponde a la fase previa a la despresurización del conducto y la imagen inferior corresponde al inicio del flujo en el sistema. La flecha negra indica el instante de tiempo del video que corresponde a la señal. La normalización se realiza con el cociente entre la amplitud entre la amplitud máxima.

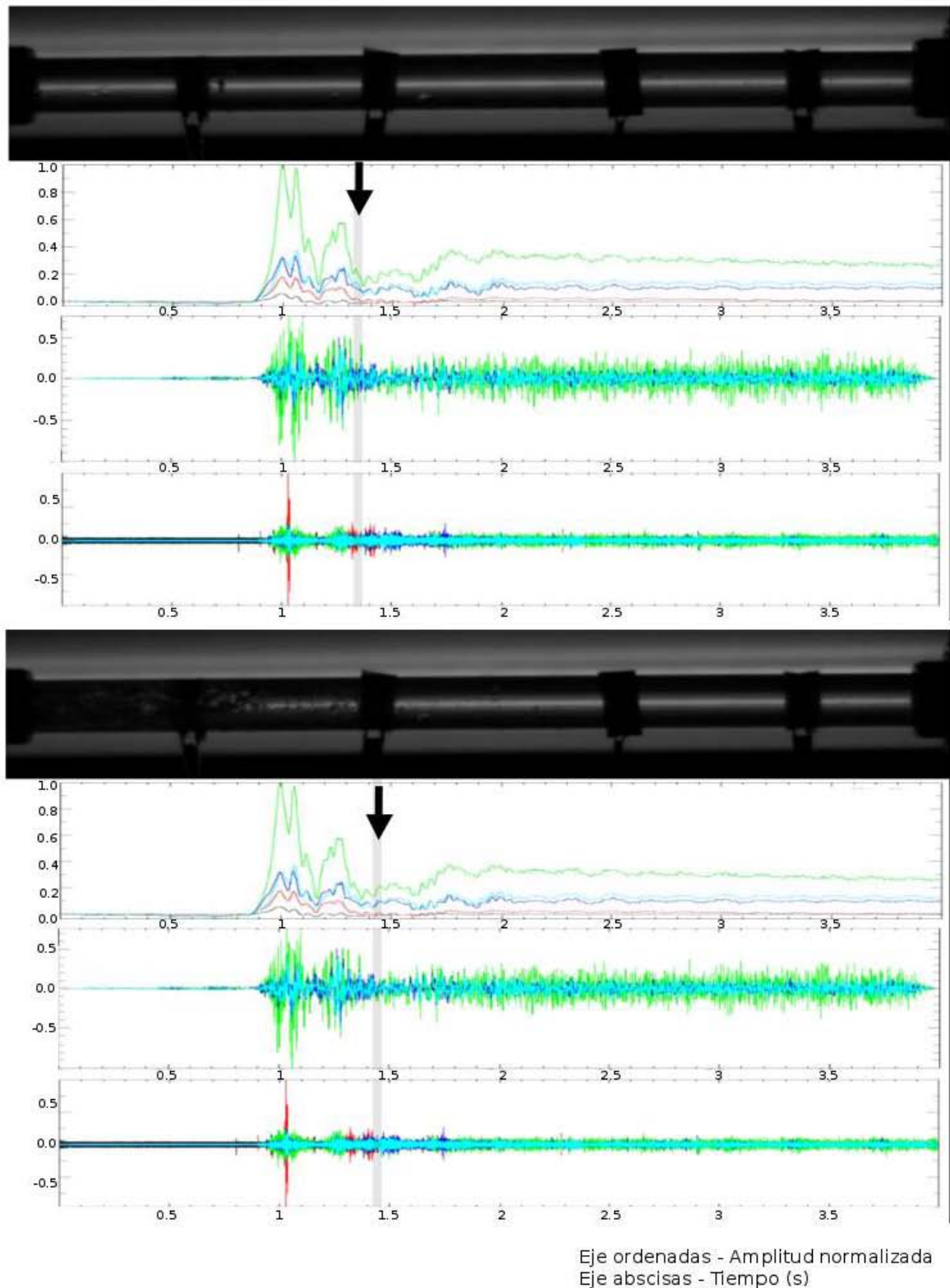


Figura 3.16. Secuencia de instantáneas tomadas del registro de video de los experimentos sincronizado con las señales para flujo de agua. Los videos fueron tomados con una velocidad de 10 000 fps a una resolución de 1280 x 780 cuadros. La imagen superior corresponde a flujo estable de agua a través del conducto y la imagen inferior corresponde a la penetración del flujo de aire dentro del flujo de agua. La flecha negra indica el instante de tiempo del video que corresponde a la señal. La normalización se realiza con el cociente entre la amplitud entre la amplitud máxima.

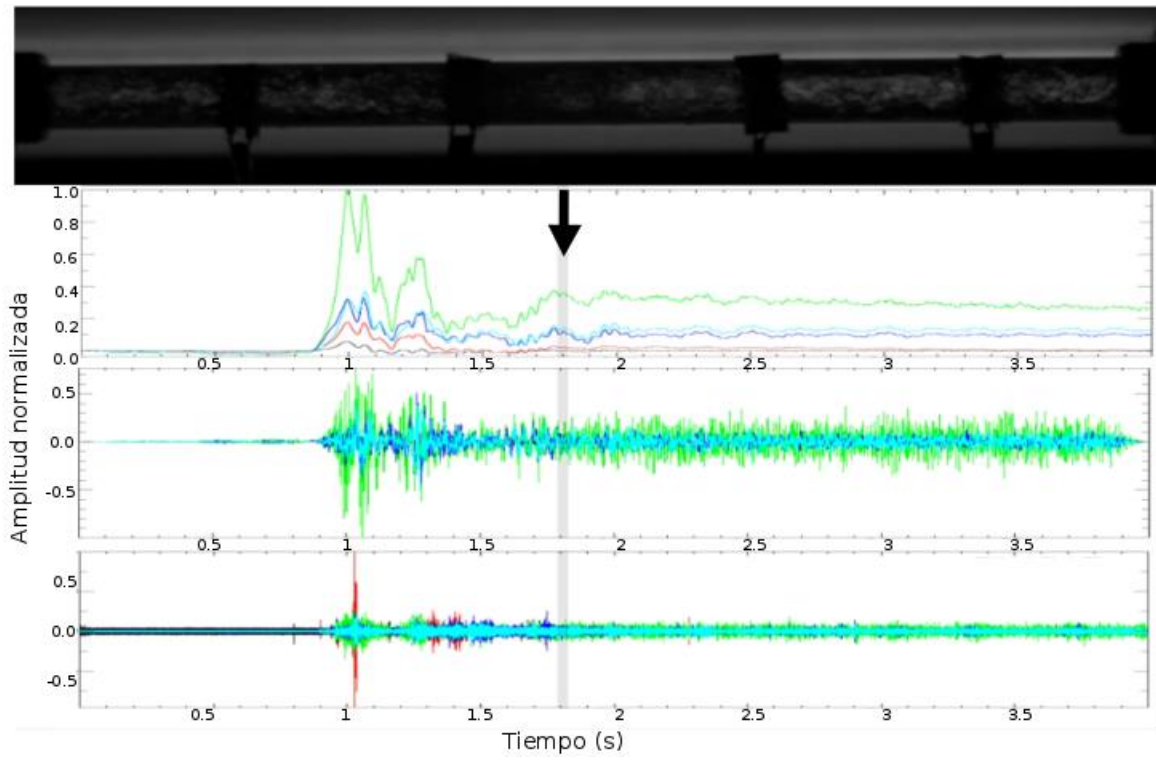


Figura 3.17. Instantánea tomada del registro de video de los experimentos sincronizado con las señales para flujo de agua. Los videos fueron tomados con una velocidad de 10 000 fps a una resolución de 1280 x 780. La imagen corresponde a la fase turbulenta de la mezcla agua – aire. La flecha negra indica el instante de tiempo del video que corresponde a la señal. La normalización se realiza con el cociente entre la amplitud entre la amplitud máxima.

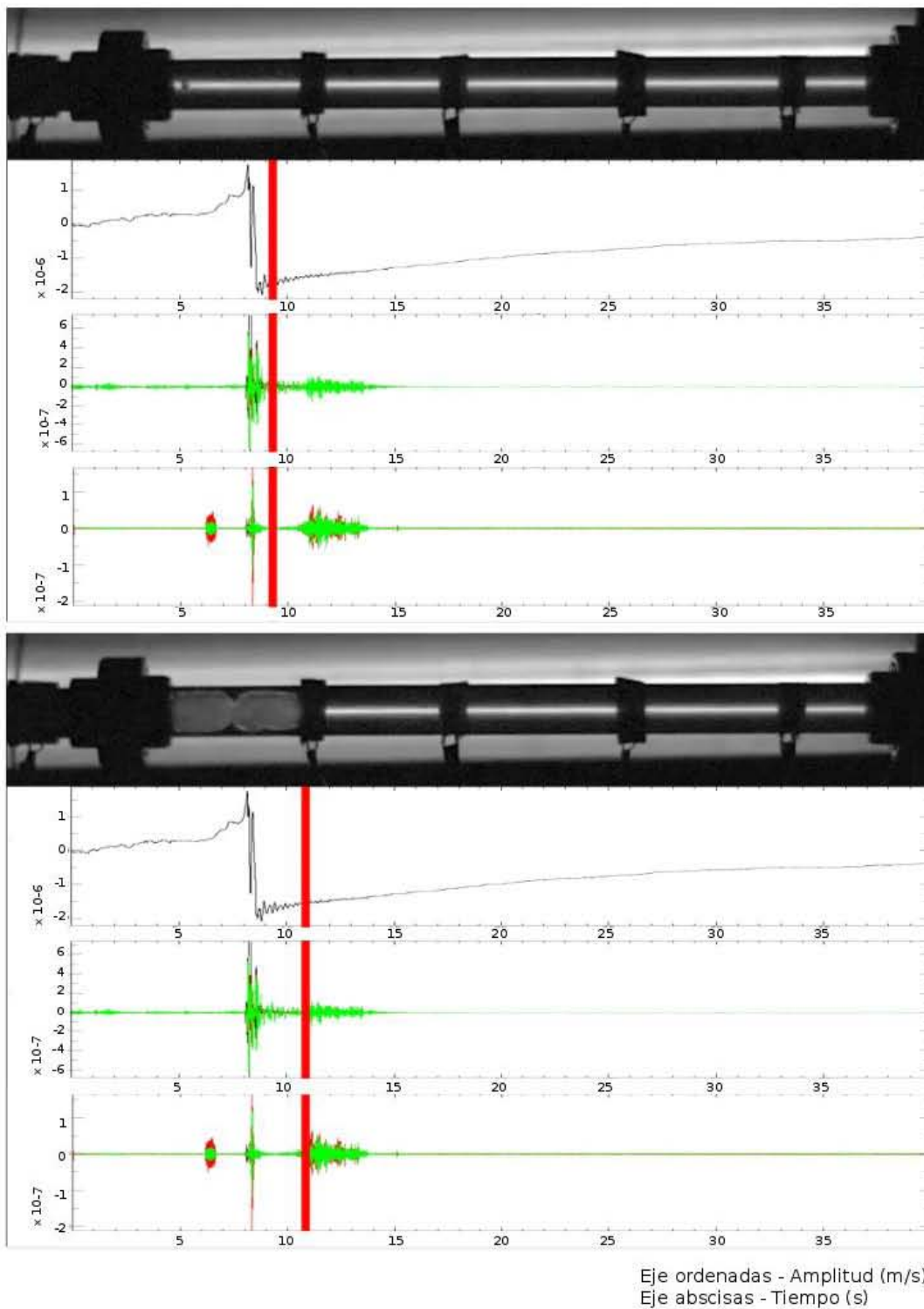


Figura 3.18. Secuencia de instantáneas tomadas del registro de video de los experimentos sincronizado con las señales para flujo de glicerina. Los videos fueron tomados con una velocidad de 1000 fps a una resolución de 1280 x 780. La imagen superior corresponde al inicio del flujo en el sistema y la imagen inferior corresponde al instante de tiempo en el que aparecen slugs. La línea roja indica el instante de tiempo del video que corresponde a la señal.

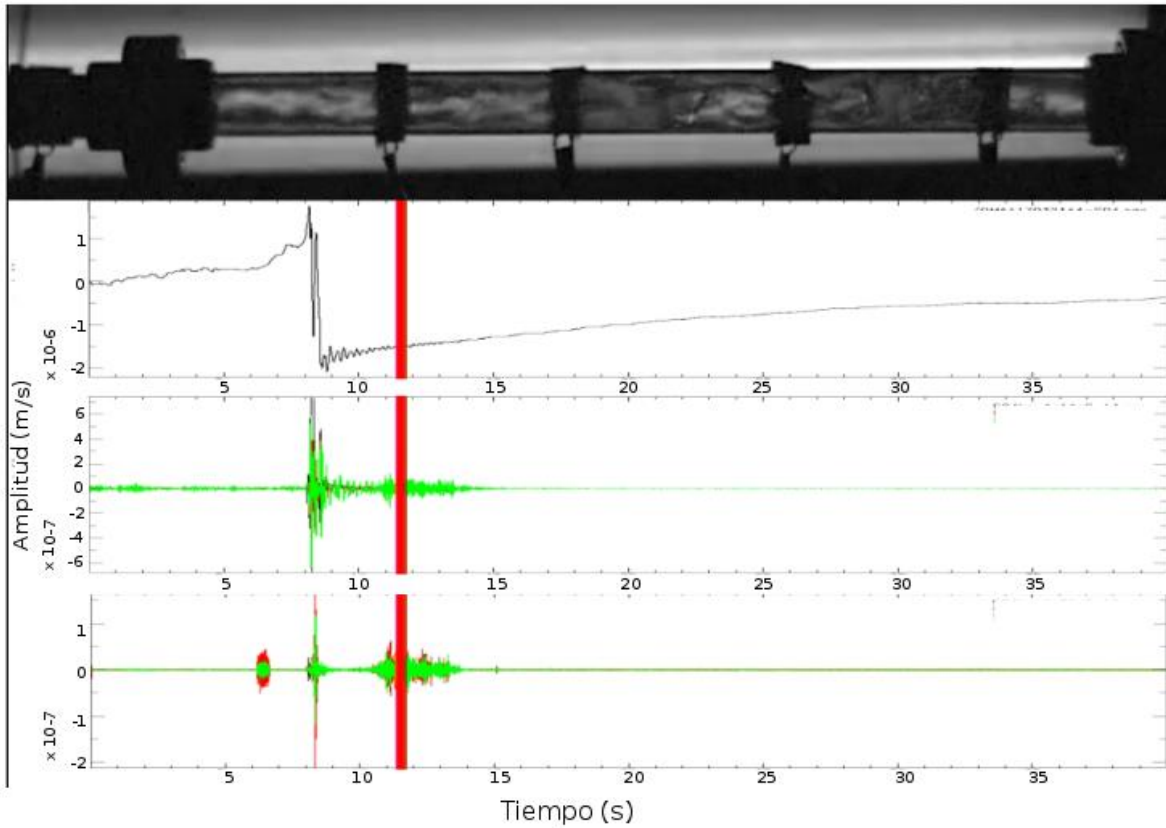


Figura 3.19. Instantánea tomada del registro de video de los experimentos sincronizado con las señales para flujo de glicerina. Los videos fueron tomados con una velocidad de 1000 fps a una resolución de 1280 x 780. La imagen corresponde a la fase de flujo “agitado” de la mezcla glicerina - aire. La línea roja indica el instante de tiempo del video que corresponde a la señal.

El número de Reynolds se asocia con la naturaleza del flujo. Al realizar este cálculo, con base en los parámetros físicos de los fluidos utilizados en los experimentos y las características geométricas de la sección de pruebas que el flujo de agua es turbulento ($R_e \gg 4000$), mientras que el flujo de glicerina es laminar ($R_e \ll 2100$).

Capítulo 4. Validación experimental del efecto fluido-sólido del modelo numérico: Comparación de datos observados vs sintéticos

4.1 Descripción de los sintéticos

En esta sección comparamos las señales registradas con los piezoeléctricos, con las señales sintéticas calculadas a partir de la solución numérica del modelo de interacción fluido - estructura CRACSS (Corona - Romero et al., 2012) (*ver Capítulo 1 sección 1.3.2*). En él se resuelven tres ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden, que definen la velocidad del fluido, los esfuerzos y los desplazamientos. En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros usados para construir los sintéticos.

El CRACSS asume que una caída de presión en el sistema fluido - cavidad da origen al desplazamiento del fluido. Para el cálculo de los sintéticos se eligió como función de excitación una función gaussiana, cuyo ancho (t_p de la señal) se determinan considerando la frecuencia fundamental del sistema y las características del fluido. La duración de esta función depende de la tasa de muestreo de la señal, y de las características geométricas del conducto. La geometría del experimento es un conducto abierto (*ver Capítulo 1 Figura 1.1*), entonces la frecuencia fundamental del sistema está determinada mediante la ecuación

$$f = \frac{v}{2L} \quad (29)$$

donde v es la velocidad de la onda de sonido en el fluido y L es la longitud del conducto.

Considerando que la velocidad promedio de propagación de la onda de sonido es de 1430 m/s en agua, y 1130 m/s en glicerina, y que la longitud de sección de pruebas $L = 0.65 \text{ m}$ entonces la frecuencia fundamental del conducto cuando está lleno de agua es de 1141.53 Hz, cuando está lleno de glicerina es de 1476.92 Hz. El recíproco de las frecuencias fundamentales son 0.0008 y 0.0006 s. Con estos valores se determinaron los valores de t_p para la función de excitación: 0.001 s para agua y 0.0001 para glicerina. La importancia del t_p de la función de excitación radica en el fenómeno de resonancia: Si el t_p coincide, o es cercano, a la frecuencia fundamental del sistema, entonces el

sistema entra en resonancia y aumenta la amplitud de las señales. El flujo laminar requiere que (Corona – Romero et al., 2012)

$$\eta^2 \gg \frac{\rho_f P_z}{6R_e^C} R_0^3 \quad (30)$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido, P_z es la variación de la presión con respecto a la longitud del tubo, R_e^C es el número de Reynolds crítico y R_0 es el radio inicial del conducto. Tomando en cuenta los parámetros para ambos casos (agua y glicerina) (ver *Tabla 4.1*) el agua no cumple esta condición, pero la glicerina sí.

Para el cálculo de los sintéticos se simuló la misma geometría de tubos, con las mismas dimensiones y el mismo número de receptores así como su localización (ver *Capítulo 2 Figura 2.2*). Asimismo, se usaron los mismos parámetros elásticos de los materiales utilizados en el modelo experimental. Con base en lo anterior se calcularon sintéticos con las siguientes geometrías:

- *Geometría No. 1: Un solo conducto*

Consiste de un conducto de 0.65 m de longitud y 0.025 m de diámetro; el extremo superior del conducto está en la superficie. Debido a la longitud del conducto cinco de los siete receptores están acoplados al conducto (ver *Figura 4.1a*). La atenuación del movimiento se define como (Corona – Romero et al., 2012)

$$A \geq \left(\frac{15}{8} \left(\frac{L}{R_E} \right)^2 - 34 \right) \frac{\eta}{\rho_0 R_E^2} \quad (31)$$

donde L es la longitud del conducto, η es la viscosidad del fluido, ρ_0 es la densidad del fluido y R_E es el radio en equilibrio del conducto. Usando la ecuación (31) se calcularon las curvas de atenuación para agua, donde $A \geq 20$ Hz y para glicerina es $A \geq 20\ 000$ Hz (ver *figuras 4.2, 4.3*). Con base a la razón L/R de esta ecuación se tomaron los valores de longitud y radio para el diseño del sistema experimental (ver *Capítulo 2 Sección 2.1*).

Con estos valores se calcularon los sintéticos para flujos de agua y glicerina. En la figura 4.4 se observa el sintético para el agua. Se aprecia un pulso monocromático (de una sola frecuencia) de aproximadamente 0.25 s de duración. El pulso es impulsivo y su frecuencia es de 1800 Hz (ver figura 4.5). En las señales de flujo de glicerina se observa también un pulso monocromático de aproximadamente 0.5 s, impulsivo y con frecuencia de 135 Hz (ver Figura 4.5). La fuente es la diferencia de presión en el conducto y la radiación de las ondas inicia desde el centro del conducto; por lo tanto, la señal más energética en ambas corridas pertenece al receptor S06, el más cercano al centro del conducto.

| Parámetros de los sintéticos | |
|-----------------------------------|-----------|
| Geométricos | |
| No. conductos | 1 |
| Longitudes (m) | 0.65 |
| Radios (m) | 0.0125 |
| Características del fluido | |
| <i>Agua</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 0.001 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1000 |
| <i>Glicerina</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 1.3 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1260 |
| Características del sólido | |
| <i>PVC (Conducto 1, 2, 6)</i> | |
| Módulo de rigidez (Pa) | 1.00E+009 |
| Velocidad de onda P (m/s) | 1100 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1410 |

| Parámetros de los sintéticos | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Geométricos | |
| No. conductos | 6 |
| Longitudes (m) | 0.30, 0.55, 0.01, 0.10, 0.01, 0.30 |
| Radios (m) | 0.0125, 0.0124, 0.0125 |
| Características del fluido | |
| <i>Agua</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 0.001 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1000 |
| <i>Glicerina</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 1.3 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1260 |
| Características del sólido | |
| <i>PVC (Conducto 1, 2, 6)</i> | |
| Módulo de rigidez (Pa) | 1.00E+009 |
| Velocidad de onda P (m/s) | 1100 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1410 |
| <i>Latón (Conducto 3, 4, 5)</i> | |
| Módulo de rigidez (Pa) | 4.01E+010 |
| Velocidad de onda P (m/s) | 4394 |
| Densidad (Kg/m ³) | 8600 |

| Parámetros de los sintéticos | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Geométricos | |
| No. conductos | 3 |
| Longitudes (m) | 0.65, 0.10, 0.30 |
| Radios (m) | 0.0125, 0.0124, 0.0125 |
| Características del fluido | |
| <i>Agua</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 0.001 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1000 |
| <i>Glicerina</i> | |
| Viscosidad (Pa s) | 1.3 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1260 |
| Características del sólido | |
| <i>PVC (Conducto 1, 3)</i> | |
| Módulo de rigidez (Pa) | 1.00E+009 |
| Velocidad de onda P (m/s) | 1100 |
| Densidad (Kg/m ³) | 1410 |
| <i>Latón (Conducto 2)</i> | |
| Módulo de rigidez (Pa) | 4.01E+010 |
| Velocidad de onda P (m/s) | 4394 |
| Densidad (Kg/m ³) | 8600 |

Tabla 4.1 Parámetros utilizados para construir sintéticos utilizando: a) un solo conducto, b) sistema de tres conductos y c) sistema de seis conductos.

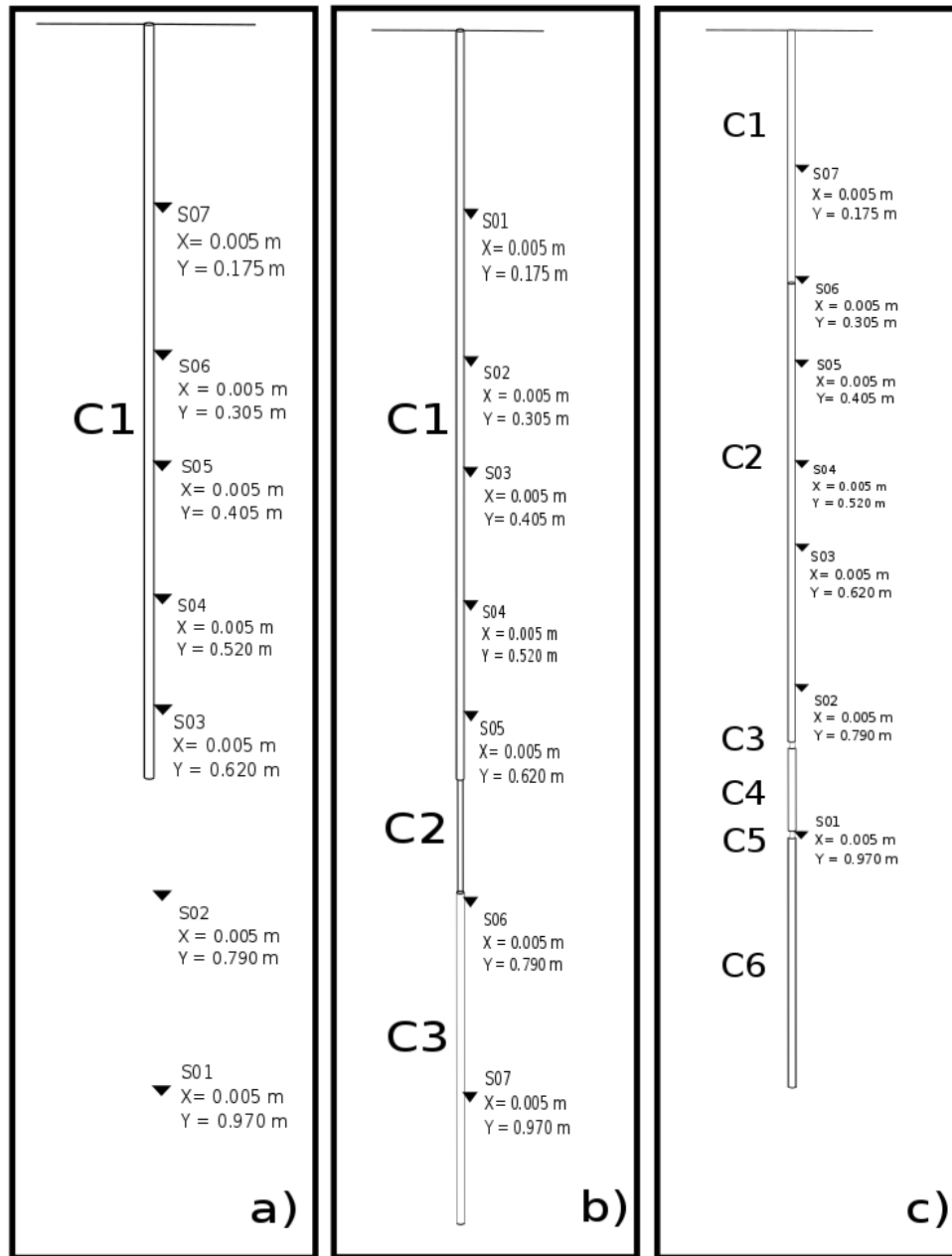


Figura 4.1. Geometrías consideradas para la construcción de los sintéticos en el modelo CRACSS: a) Un sólo conductor de 0.65 m de longitud. b) Tres conductos: C1 con 0.65 m de longitud, C2 con 0.1 m de longitud y C3 con 0.30 m de longitud. c) Seis conductos: C1 con 0.30 m de longitud, C2 con 0.55 m de longitud, C3 con 0.01 m de longitud, C4 con 0.1 m de longitud, C5 con 0.01 m de longitud y C6 con 0.30 m de longitud.

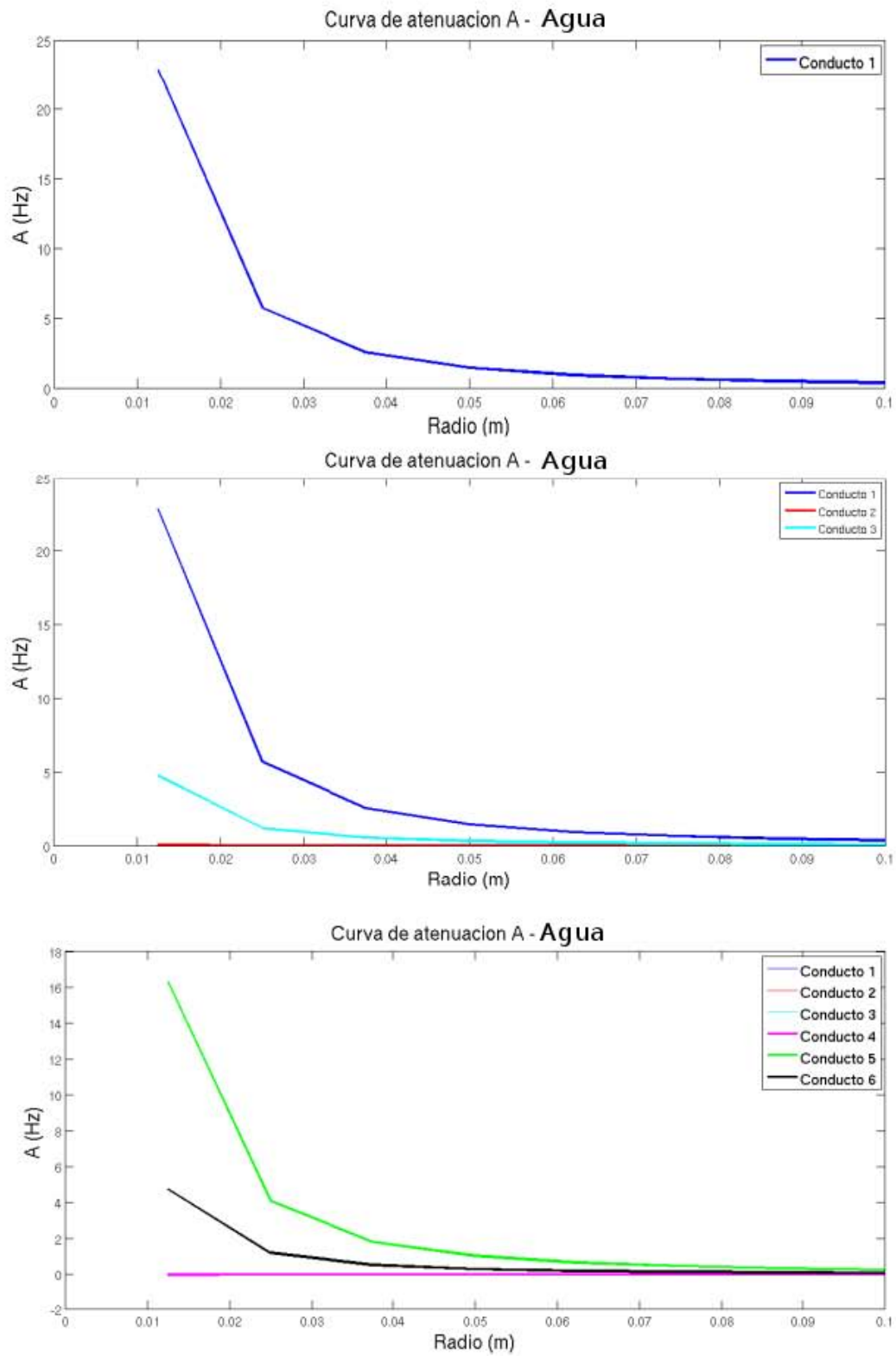


Figura 4.2. Curvas de atenuación calculadas para flujo de agua usando la ec. 20: El panel superior es para un solo conducto, el panel medio es para tres conductos y el panel inferior es para 6 conductos.

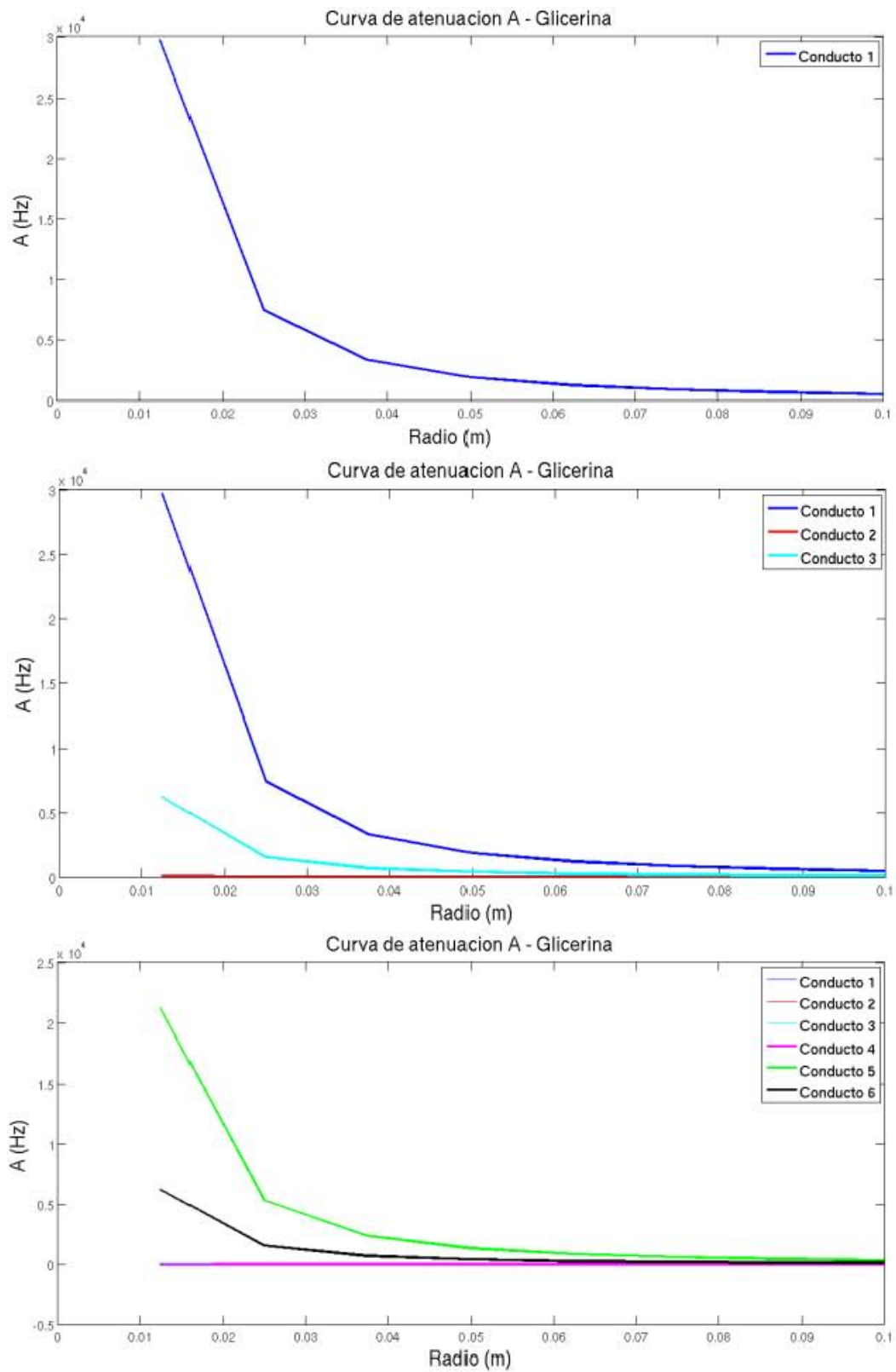


Figura 4.3. Curvas de atenuación calculadas para flujo de glicerina usando la ec. 20: El panel superior es para un solo conducto, el panel medio es para tres conductos y el panel inferior es para 6 conductos.

- Geometría No. 2: Tres conductos

Esta geometría consiste de dos conductos de PVC y un tercero de latón. La longitud de cada conducto, en dirección descendente es: 0.65 m, 0.10 m y 0.30 m. El radio del segundo conducto es 1% más pequeño que el radio de los otros conductos, es decir, 0.0124 m (*ver Figura 4.1 panel b*). El segundo conducto simula la válvula de apertura cuyo material de fabricación es bronce.

Las señales sintéticas que produce esta geometría son más variadas en frecuencia: la adición de dos conductos con dimensiones ligeramente distintas dan lugar a características, tanto temporales como en frecuencia, cambiantes en comparación con las obtenidas con un conducto. En el caso de las señales producidas por flujo de agua observamos dos tipos de señales (principalmente en los receptores S07 – S04) de 0.02 – 0.04 s. En los receptores S01, S02 y S03 la duración de las señales es más larga (0.12 s aproximadamente). Las frecuencias de las señales son de 1510 Hz, 3250 Hz y 41 400 Hz (*ver figuras 4.5, 4.6, 4.7*).

El número de frecuencias que contiene la señal coincide con el número de conductos, lo que justifica que cada conducto contribuye con una frecuencia característica. La amplitud del pico en el espectro de amplitud está relacionada con la posición del receptor en el conducto (respecto a la posición vertical del receptor). En los sensores S01, S02, S03 y S04 la máxima amplitud espectral a 1510 Hz está dominada por la respuesta dinámica del conducto superior ($L = 0.65$ m), en los sensores S05 y S06 la componente de alta frecuencia (40 000 Hz) producida por el conducto C02 ($L = 0.10$ m) es la más prominente.

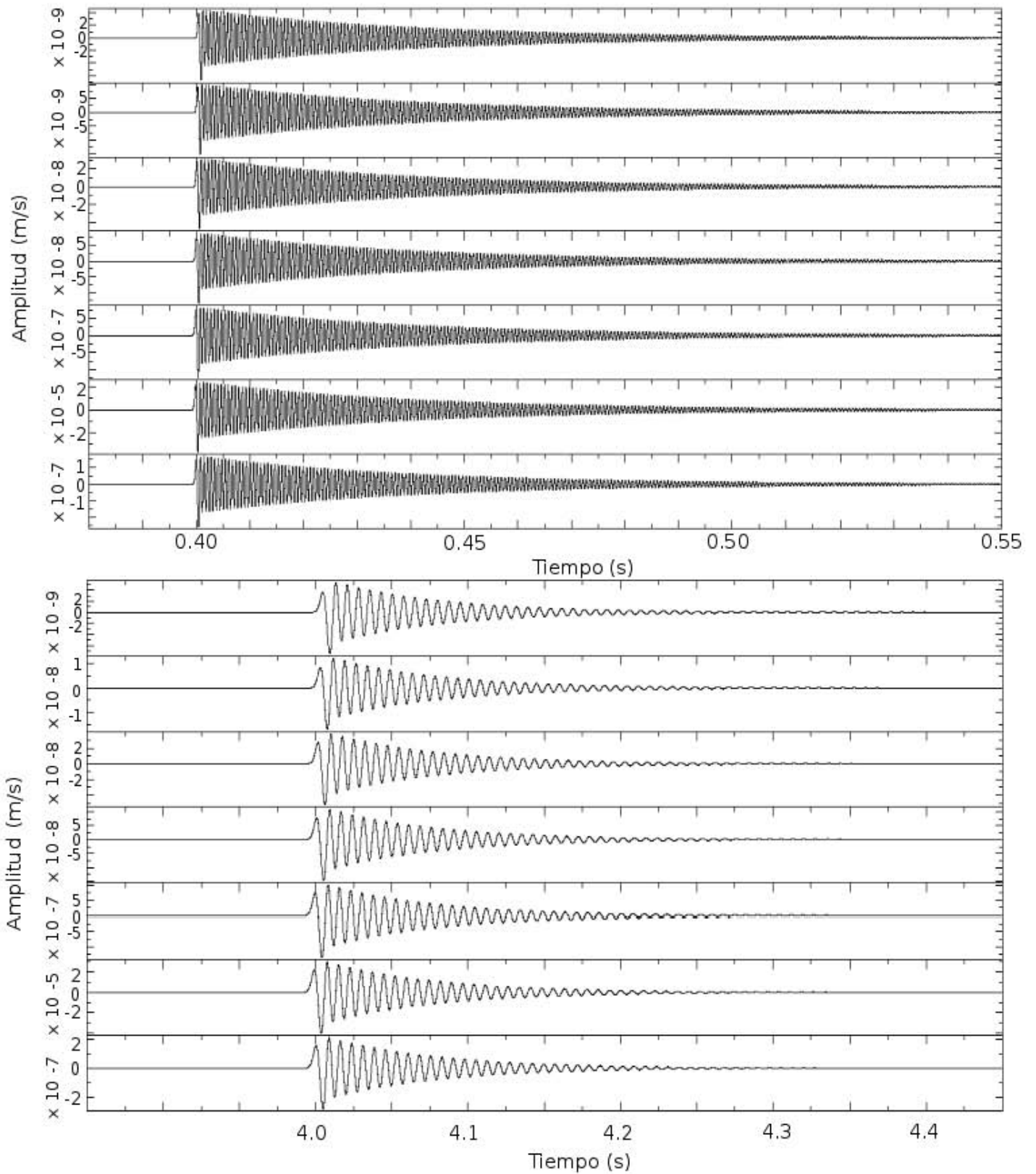
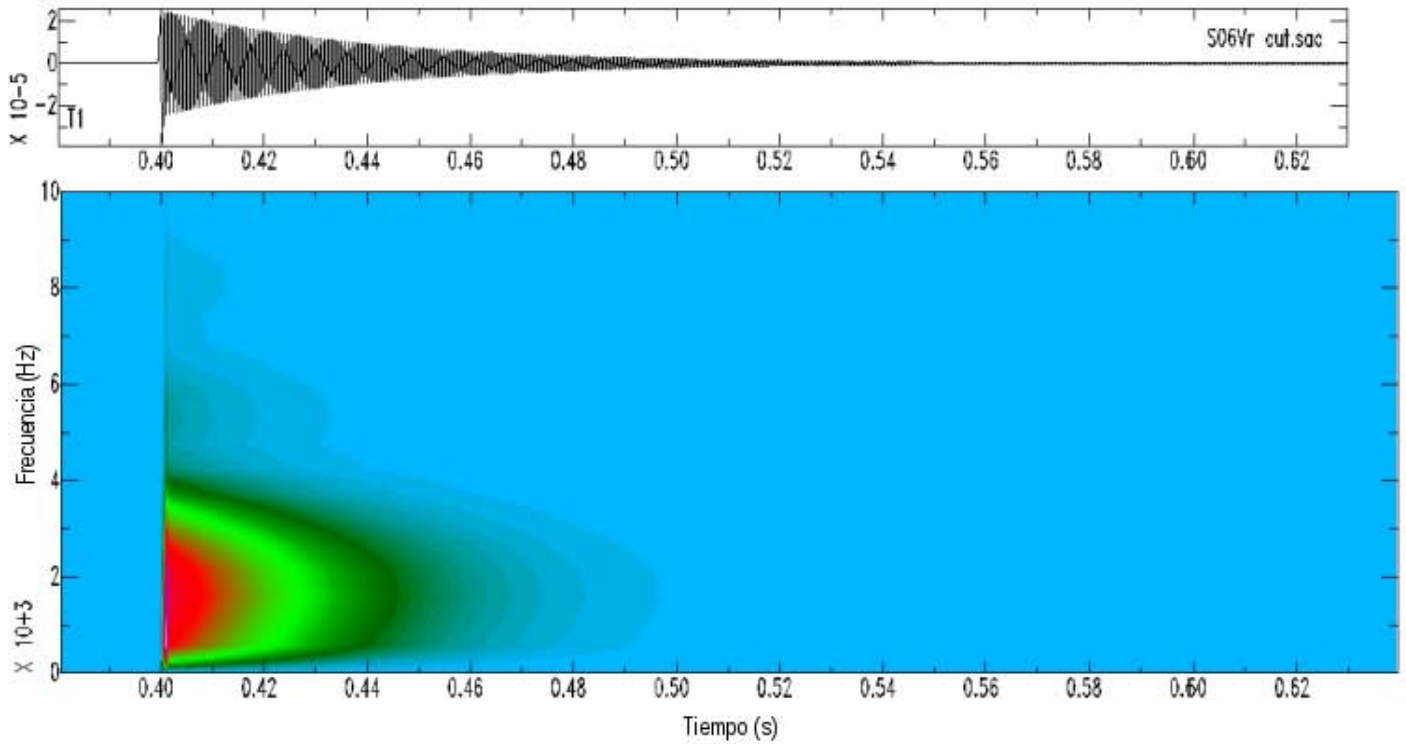


Figura 4.4. Sintéticos calculados para un solo conducto usando el modelo CRACSS. Los parámetros utilizados se encuentran en la tabla 4.1. El panel superior corresponde al flujo de agua y el panel inferior al flujo de glicerina.

Flujo de agua - Un conducto



Flujo de glicerina - Un conducto

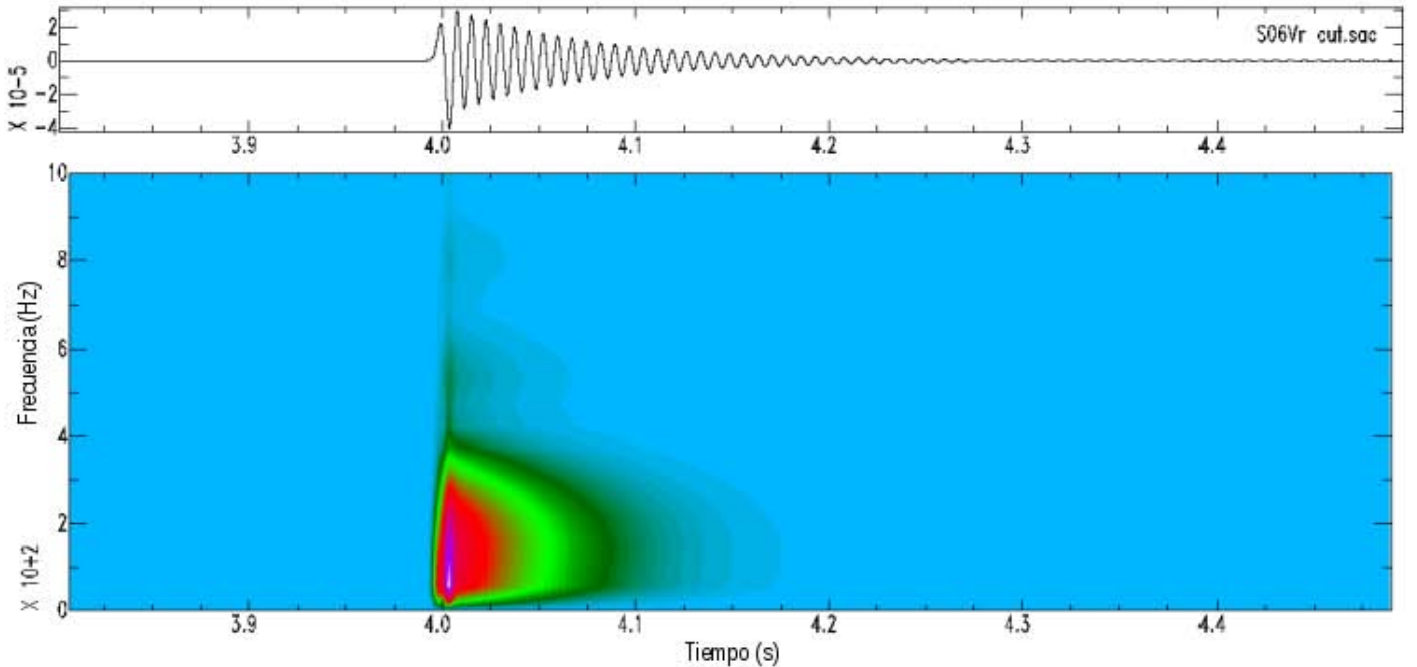


Figura 4.5. Espectrogramas calculados para: sintético de flujo de agua (superior) y sintético de flujo de glicerina (inferior). El tamaño de ventana para el cálculo de los sintéticos del panel superior es de 0.001 s con traslapes entre ventanas cada 0.0001s; el tamaño de ventana del panel inferior es de 0.01 con traslapes cada 0.001 s. El método utilizado para construir los espectrogramas es por Densidad Espectral de Potencia (PDS).

Por último en el sensor S07 predomina la componente de la señal que produce el conducto inferior ($L = 0.30$ m). Los sensores cercanos a la válvula presentan una componente de alta frecuencia que se atenúa conforme aumenta la distancia entre la válvula y el receptor; sin embargo la respuesta de la sección principal se mantiene dominante en 1510 Hz.

- Geometría No. 3: Seis conductos

Como en el sistema experimental la unión entre la válvula principal y los tubos no es perfecta, es decir, no asegura completamente la continuidad del diámetro interno, se exploró una geometría similar a la No. 2 con algunos cambios en la sección central. Estos cambios están entre la válvula y representan los espacios pequeños que dan lugar a una variación en el diámetro del tubo. Con base en lo anterior se consideran seis conductos C1, C2, C3, C4, C5, C6 (en orden descendente): tres conductos C1, C5, C6 de PVC con el mismo radio (0.0125 m) pero con distintas longitudes (0.30 m, 0.55 m, 0.30 m) y tres conductos de latón, C3 con el mismo radio que los conductos de PVC y de 0.10 m de longitud y los dos restantes, C2 Y C4, con longitudes del 10% con respecto al conducto anterior (0.01 m) y cuyo valor de radio tiene una reducción del 1% con respecto al radio interno de los demás conductos (0.0124 m) (ver figura 4.1c).

La inserción de C2 y C4 entre C1 – C3 y C3 – C5 representan los pequeños espacios que corrigen al acoplamiento imperfecto en las juntas de diferentes materiales de la válvula principal y los tubos. Podemos observar que la forma de onda de estas señales es parecida a las señales generadas con la geometría no. 2 (ver figura 4.10). Las señales de los receptores S01 – S03 tienen una duración aproximada de 0.10 s, S03 – S06 es de 0.01 s y en S07 la duración es de 0.04 s. En el caso del flujo de glicerina, en los receptores S01, S02 y S03 las duración de la señal es de 0.30 s, en los receptores S04, S05 y S06 es de 0.05 – 0.2 s y en el receptor S07 es de 0.15 s.

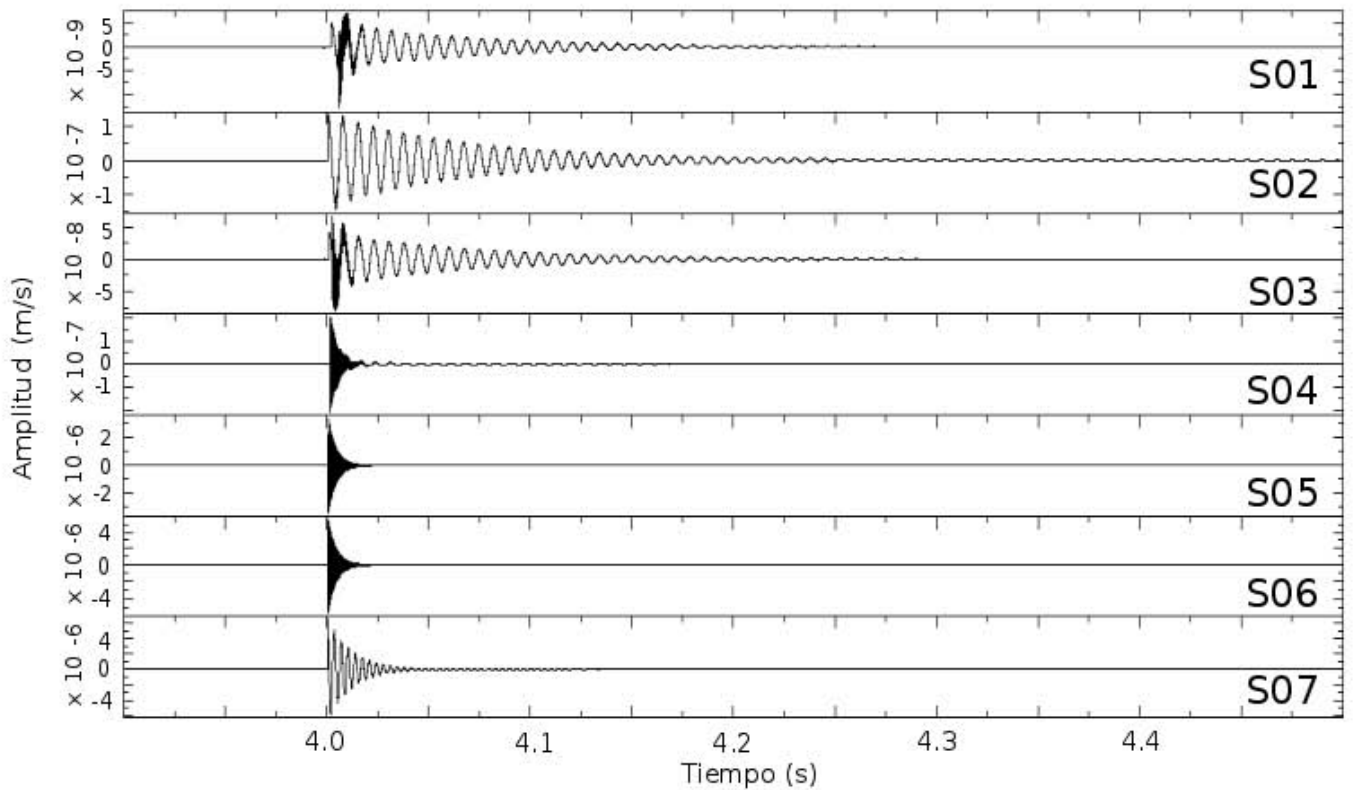
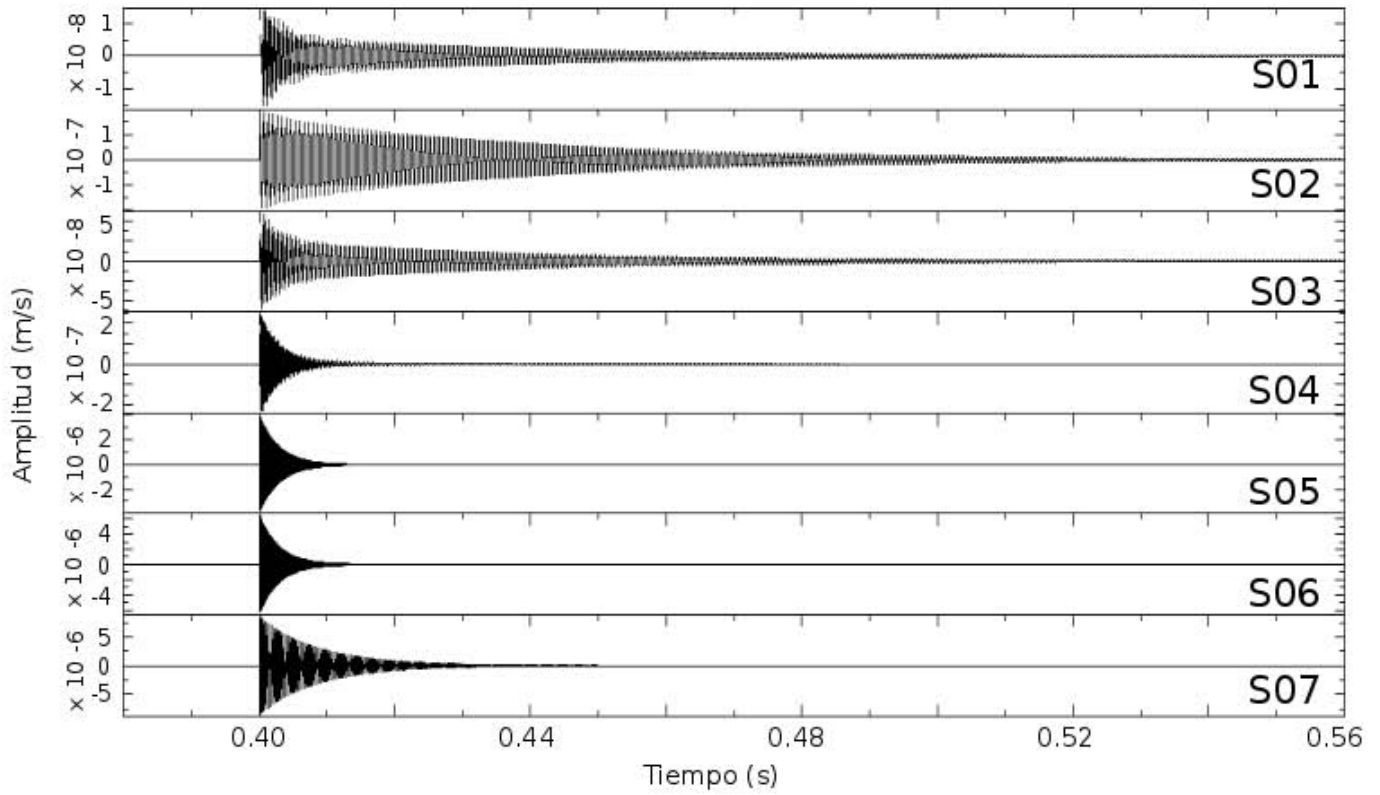


Figura 4.6 Sintéticos producidos por CRACSS para flujo de agua (superior) y flujo de glicerina (inferior) construidos con geometría de tres conductos (Figura 4.1 panel b). La tasa de muestreo son de 500 000 Hz y 50 000 Hz para agua y glicerina respectivamente.

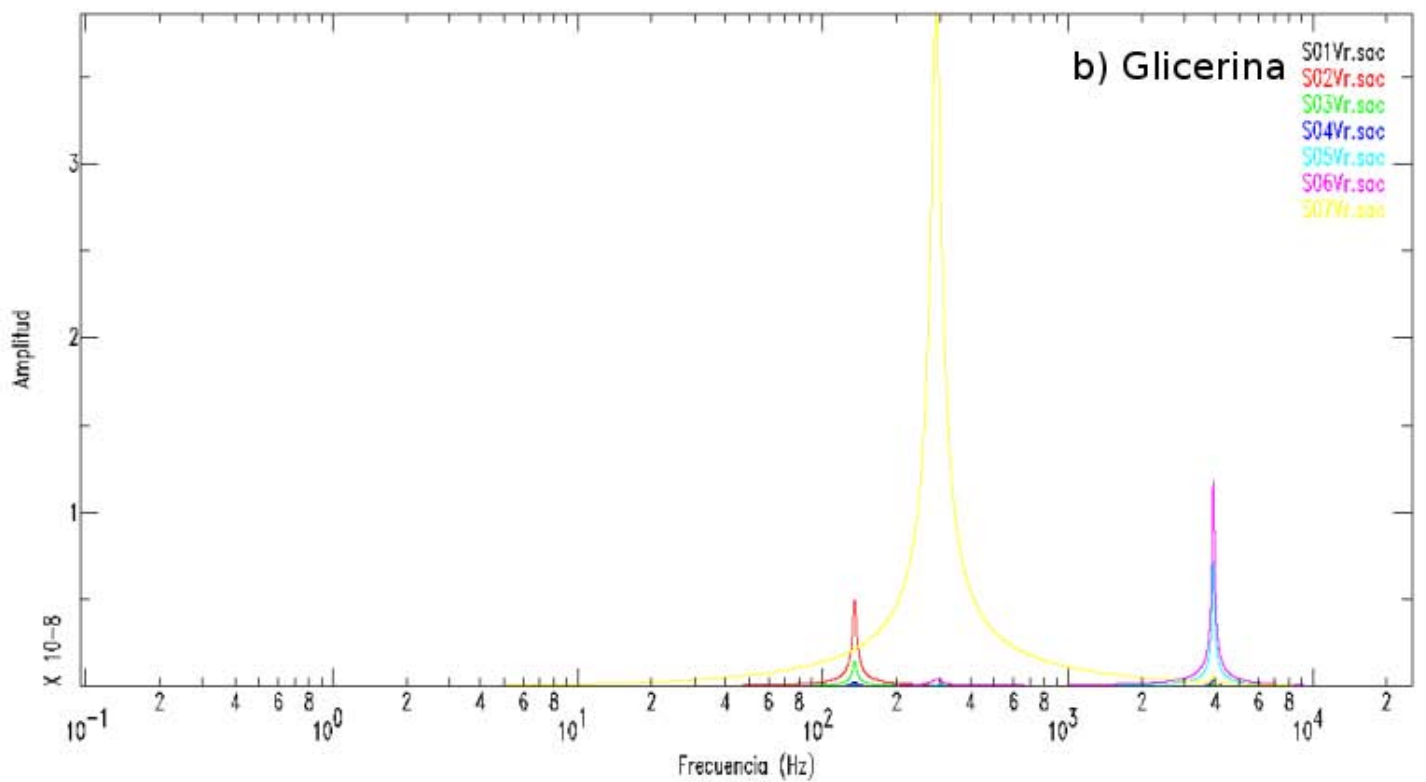
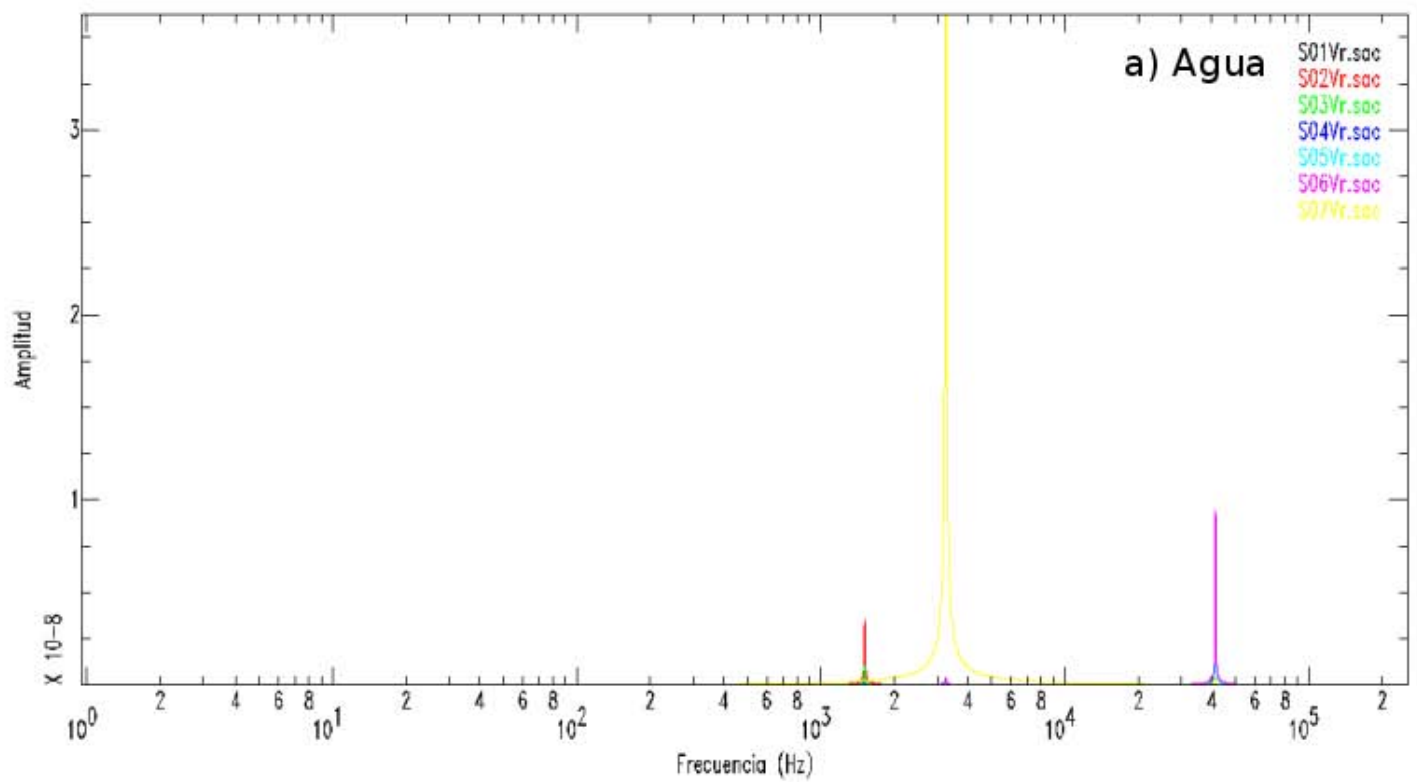


Figura 4.7. a) Espectros de amplitud con geometría de tres conductos de: a) flujo de agua y b) flujo de glicerina. Ambos espectros se construyeron utilizando la Transformada Rápida de Fourier. El intervalo de muestreo en a) es de 0.000002 s y en b) es de 0.00002 s.

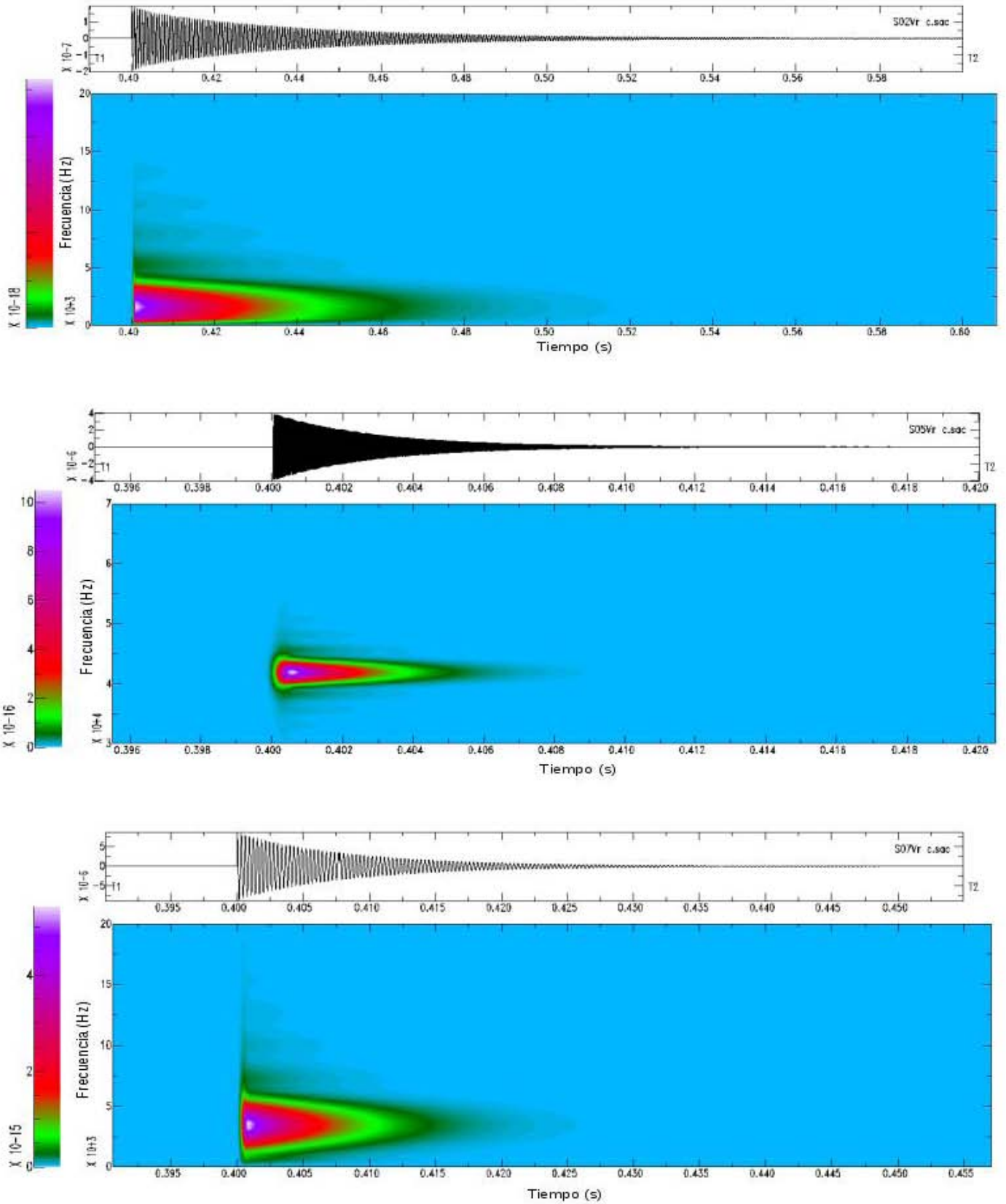


Figura 4.8. Espectrogramas calculados a partir de los sintéticos de flujo de agua. El tamaño de ventana es de 0.001 s con traslape de ventana cada 0.0001 s. El método utilizado para calcular los espectrogramas es Densidad Espectral de Potencia (PDS). El espectrograma del panel superior corresponde a la señal del receptor S02, el panel medio corresponde a la señal del receptor S05 y el panel inferior a la señal del receptor S07.

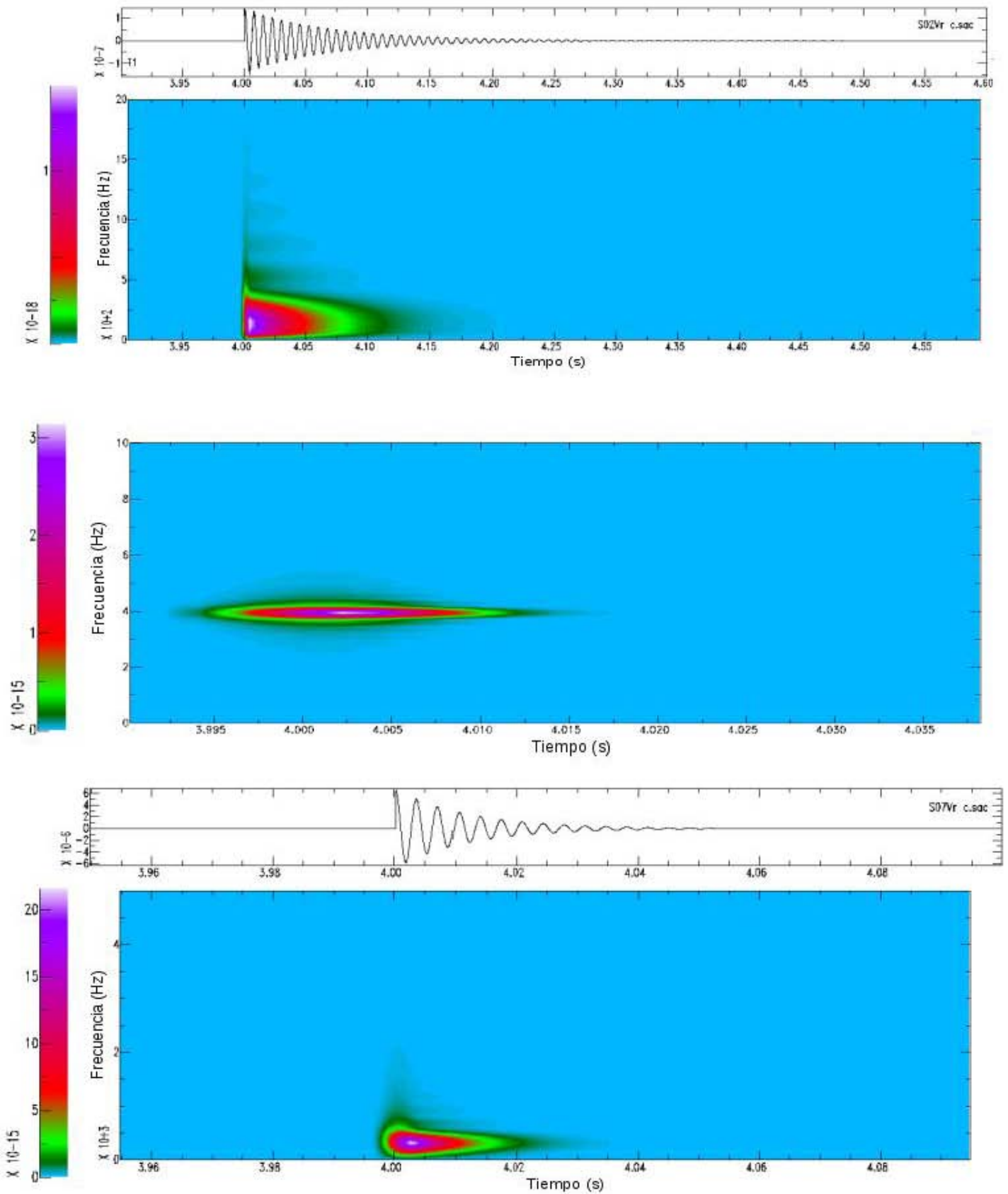


Figura 4.9. Espectrogramas calculados a partir de los sintéticos de flujo de glicerina. El tamaño de ventana es de 0.01 s con traslape de ventana cada 0.001 s. El método utilizado para calcular los espectrogramas es Densidad Espectral de Potencia (PDS). El espectrograma del panel superior corresponde a la señal del receptor S02, el panel medio corresponde a la señal del receptor S05 y el panel inferior a la señal del receptor S07.

En términos de la frecuencia, en los experimentos con agua la frecuencia dominante es de 55 000 Hz, y las frecuencias restantes son 1785 Hz, 3250 Hz, 41 400 Hz y 55 100 Hz. En el caso del experimento con glicerina, la frecuencia dominante es de 5500 Hz, y las frecuencias restantes son de 160 Hz, 290 Hz, 3925 Hz y 5510 Hz (ver figuras 4.10, 4.11). Tanto en el experimento de agua como en el experimento de glicerina se presentan otras frecuencias, que son muy pequeñas en comparación con las frecuencias principales de los conductos, y cuyo origen está en la no linealidad del sistema.

En las geometrías No. 2 y No. 3 se observa que la reducción en el radio de los conductos contribuye a la señal resultante con una respuesta de frecuencia alta en comparación con conductos más grandes. Esto es debido a que se establece en el modelo que la geometría del conducto (la longitud y el radio) y la viscosidad del fluido son los parámetros que controlan la frecuencia resultante de la señal (Corona – Romero et al., 2012).

4.2 Comparación entre resultados

CRACSS es un modelo matemático desarrollado bajo ciertas consideraciones (flujo monofásico incompresible y Newtoniano), que se reflejan en las ecuaciones correspondientes. Una de estas consideraciones tiene que ver con la naturaleza del flujo: CRACSS está desarrollado para flujos laminares. Esta consideración de flujo se refleja en el perfil de velocidad de Hagen – Poiseuille, que es una solución analítica de las ecuaciones de Navier – Stokes. Entonces, dadas las características del experimento, es posible comparar los resultados experimentales con sintéticos calculados con CRACSS. Los efectos de la onda de presión son evaluados solo en la frontera fluido – sólido y la evolución de esta contribución se encuentra fuera del alcance de esta tesis.

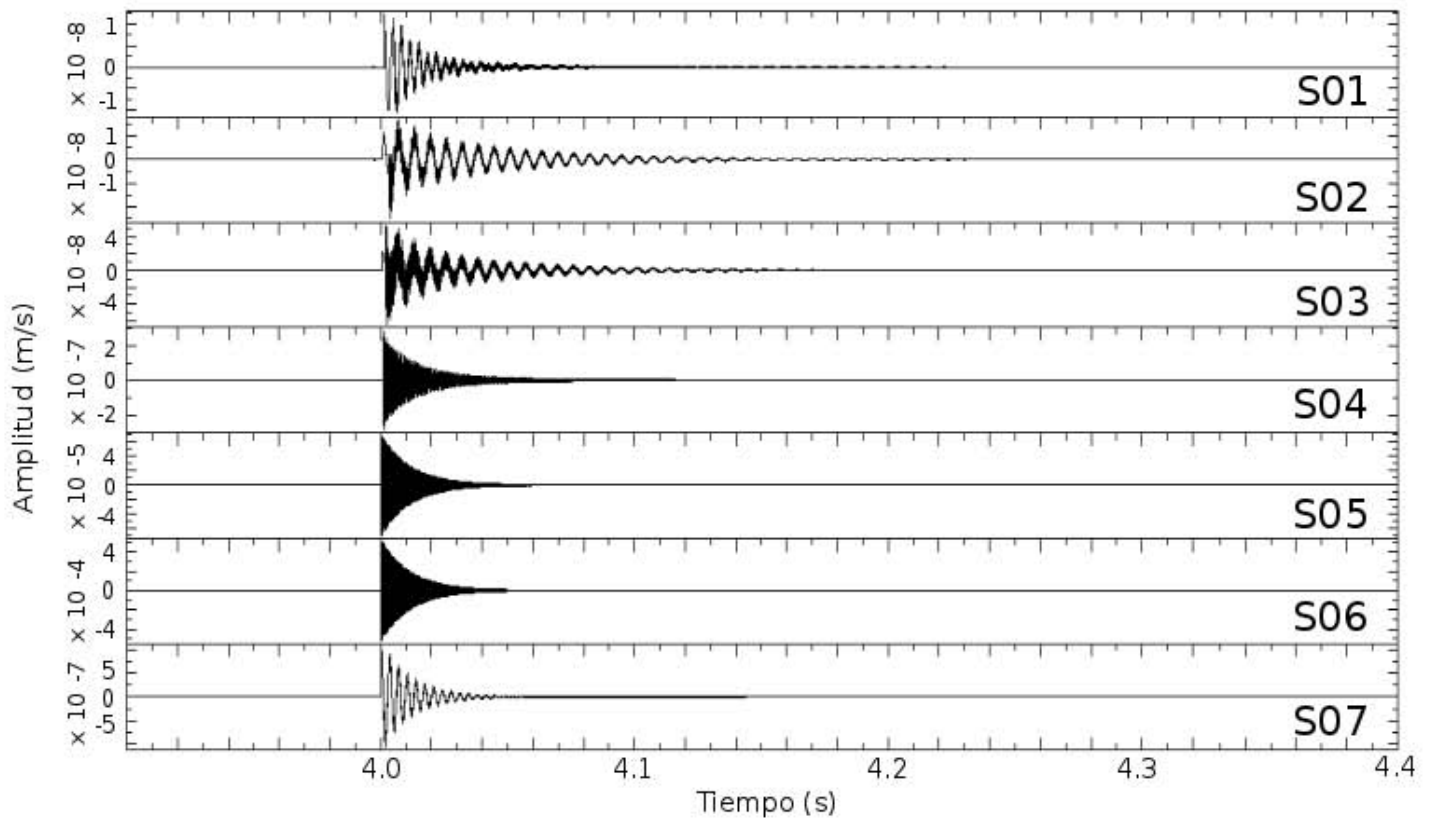
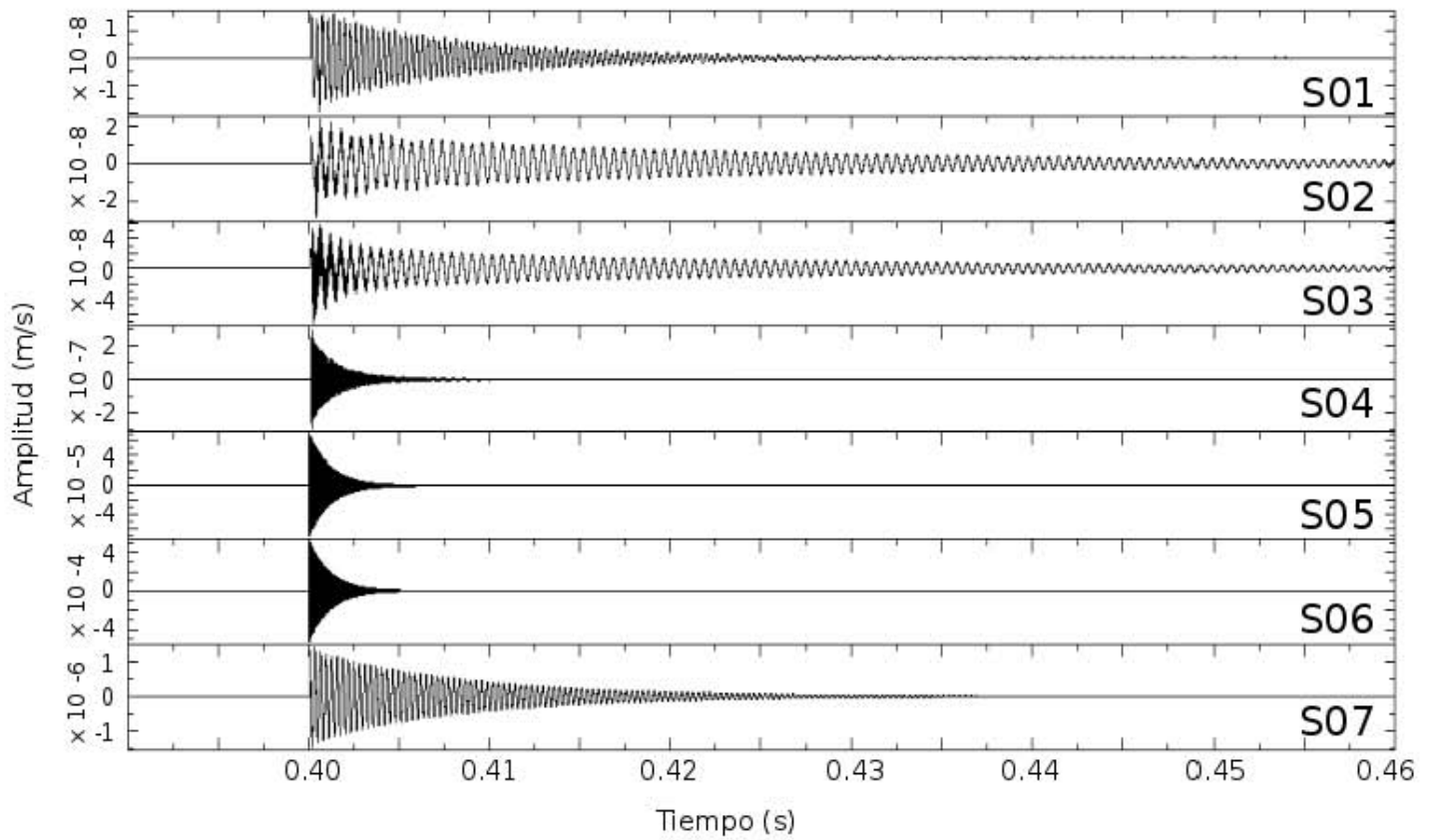


Figura 4.10. Sintéticos producidos por el modelo CRACSS flujo de agua (panel superior) y flujo de glicerina (panel inferior) construidos usando una geometría de seis conductos (Figura 4.1 panel c). La tasa de muestreo es de 500 000 Hz y 50 000 Hz para agua y glicerina respectivamente.

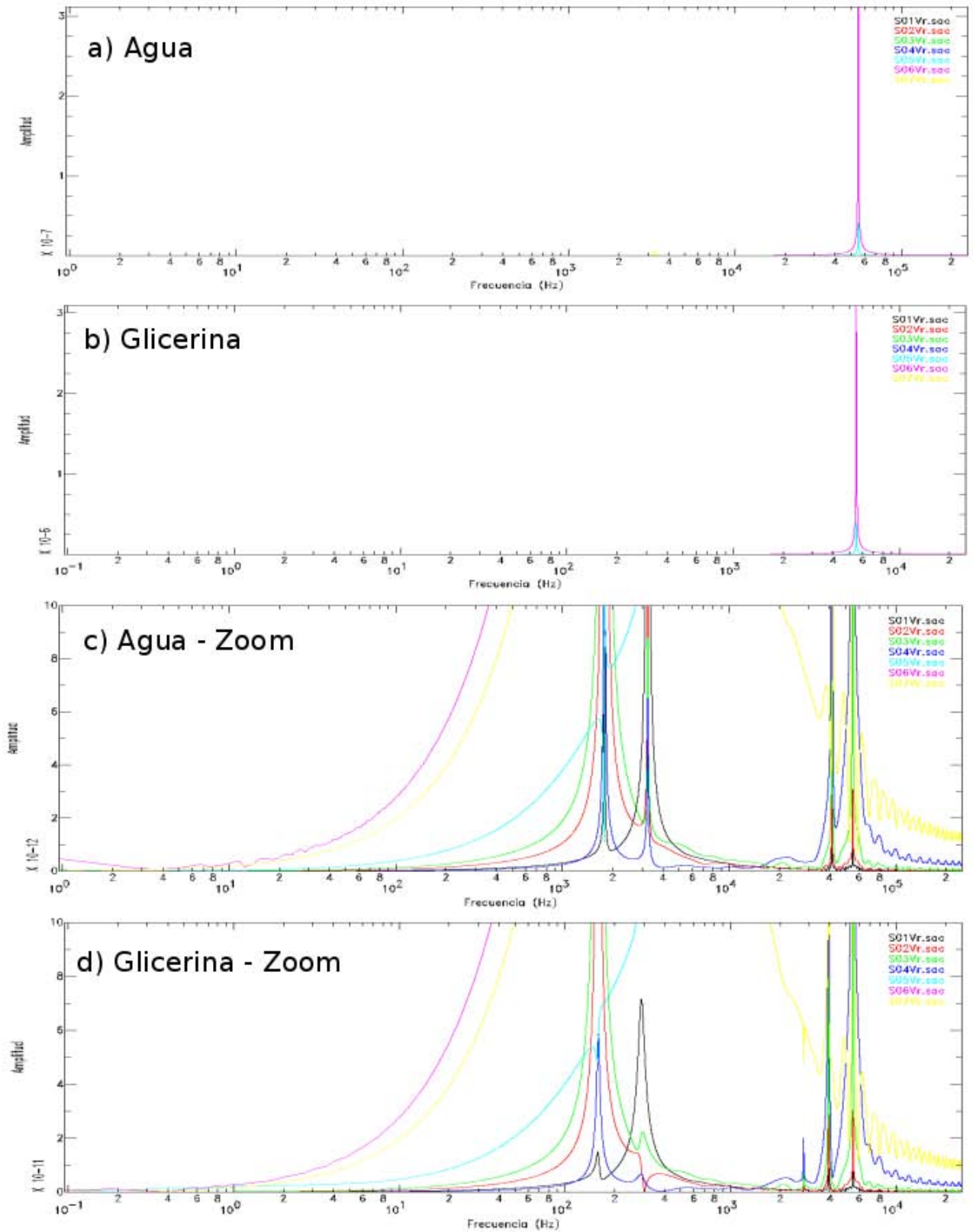


Figura 4.11. a) Espectros de amplitud de los sintéticos con geometría de seis conductos: a) Flujo de agua y b) Flujo de glicerina. c) Zoom al espectro de amplitud del panel a) en el intervalo de amplitud $0 - 1 \times 10^{-10}$. d) Zoom al espectro de amplitud del panel b) en el intervalo de amplitud $0 - 1 \times 10^{-10}$. Los espectros se construyeron utilizando la Transformada Rápida de Fourier, el intervalo de muestreo en a) es de 0.000002 s y en b) es de 0.00002 s.

En el *Capítulo 3 Sección 3.2.2 Sincronización señal – video* se mencionó que la fase laminar de los experimentos se determina al observando la trayectoria de algunas burbujas de tamaño considerable. Se determinó que la parte aparente laminar de los experimentos con flujo de agua se encuentra en el intervalo 0.8 - 1.4 s y en los experimentos de glicerina está en el intervalo 8.0 – 10.5 s. Los sintéticos muestran que el flujo dentro de un conducto con dimensiones similares a la sección de pruebas inducen una oscilación con frecuencia de 1510 Hz en los experimentos de agua, y de 135 Hz en los experimentos de glicerina; por lo tanto, se toman los registros filtrados de ancho de banda que tengan el mismo orden de magnitud de las frecuencias de los sintéticos, es decir, se toma el registro de 1000 – 10 000 Hz con flujo de agua y de 100 – 1000 para flujo de glicerina (ver figuras 4.12, 4.13). En el caso del flujo de agua la amplitud de la señal sintética es 20% mayor con respecto a la señal experimental, la diferencia en frecuencia dominante es de 70 Hz (1450 Hz para la señal experimental y 1520 Hz para la señal teórica). En el caso del flujo con glicerina las amplitudes se encuentran dentro del mismo rango con una diferencia del 20%; sin embargo, la diferencia en frecuencia dominante para ambos registros es de aproximadamente 45 Hz (90 Hz para la señal experimental y 135 Hz para la señal teórica). La diferencia porcentual entre frecuencias dominantes, para el flujo de agua, es del 5% mientras que para el flujo de glicerina es del 33%; el origen de estas diferencias puede estar relacionada a algún aspecto físico, con la tasa de muestreo utilizada, o con el sensor mismo. Sin embargo, la sincronización con el registro de video muestra que los registros mostrados en las figuras 4.12 y 4.13 pertenecen al proceso de despresurización y flujo de fluidos. Debido a la naturaleza del flujo de agua en los experimentos la comparación entre señales sintética y experimental no es posible. Sin embargo, con el modelo CRACSS fue posible estimar la frecuencia de oscilación de un conducto con los mismos parámetros del experimento con flujo de agua, debido a que la frecuencia depende de las características geométricas del conducto y la viscosidad del flujo (Corona – Romero et al., 2012).

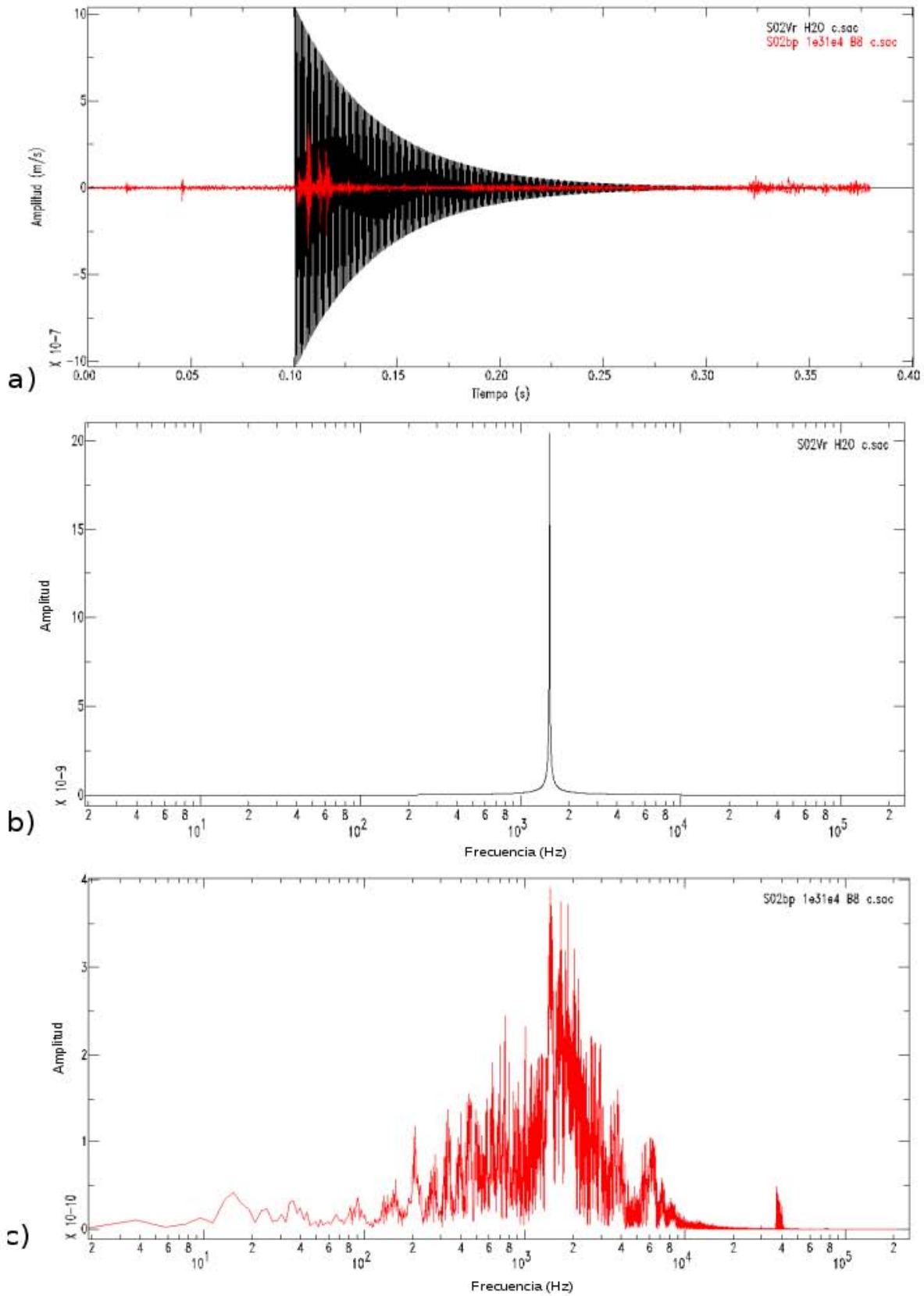


Figura 4.12. a) Comparación de la señal experimental (rojo) con la señal obtenida numéricamente (negro) en el receptor S02 para el flujo de agua. b) Espectro de amplitud de la señal sintética en el receptor S02. c) Espectro de amplitud de la señal experimental en el receptor S02. Los espectros se calcularon utilizando la Transformada Rápida de Fourier. El intervalo de muestreo es de 0.000002 s.

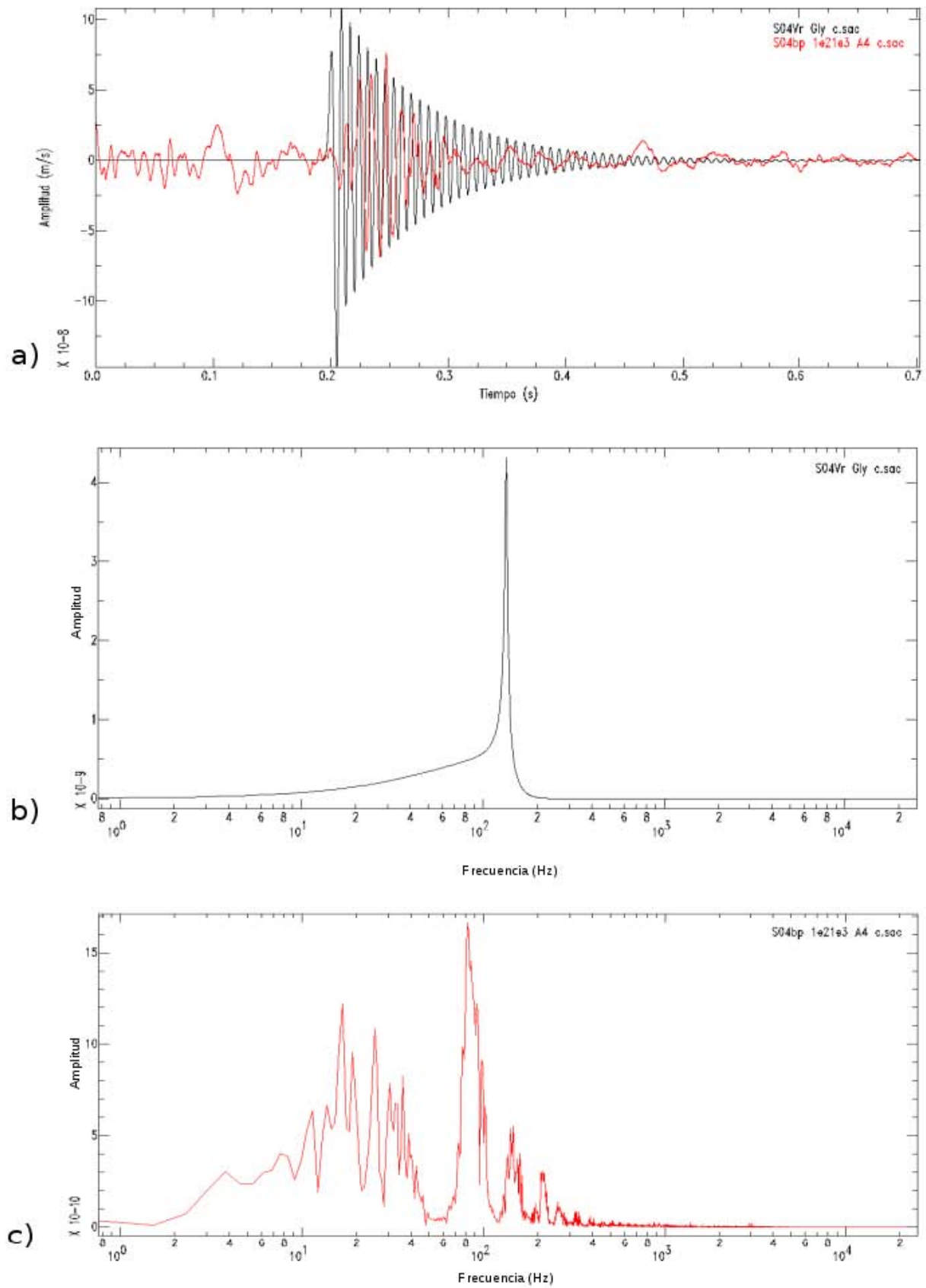


Figura 4.13. a) Comparación de la señal experimental (rojo) con la señal obtenida numéricamente (negro) en el receptor S02 para el flujo de glicerina. b) Espectro de amplitud de la señal sintética en el receptor S04. c) Espectro de amplitud de la señal experimental en el receptor S04. Los espectros se calcularon utilizando la Transformada Rápida de Fourier. El intervalo de muestreo es de 0.000002 s.

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se exploró experimental y numéricamente la respuesta elástica de conductos cilíndricos inducida por el flujo de fluidos viscosos. Se diseñó y construyó un sistema experimental cuyas dimensiones dependen de la razón L/R considerada en el modelo CRACSS (*ver Capítulo 1 sección 1.3.2*) para poder reproducir oscilaciones por flujo. El sistema experimental es capaz de establecer un flujo mediante la despresurización súbita. Para presurizarlo se inyectó aire por medio de un compresor, hasta alcanzar una presión en el intervalo 1 - 3 bar en el tubo inferior (*ver Capítulo 2 Figura 2.1*). Los fluidos utilizados fueron aire, agua y glicerina con viscosidades de 0.000001 Pa s, 0.001 Pa s y 1.3 Pa s y las series de tiempo fueron registradas por sensores piezoeléctricos acoplados a lo largo de la sección de pruebas (*ver Capítulo 2 Figura 2.1*).

Pese a la baja densidad y viscosidad, se consideró adecuado para caracterizar la respuesta del sistema en tiempo y frecuencia. En los experimentos con flujo de aire, observamos que el contenido de frecuencias de las señales registradas por los sensores piezoeléctricos (*ver Capítulo 2 Figura 2.3*), está principalmente distribuido en tres anchos de banda a saber: LFC (Componente de Baja Frecuencia), MFC (Componente de Media Frecuencia) y HFC (Componente de Alta Frecuencia). Estos intervalos de frecuencias presentan picos característicos en 0.01, 80 y 8000 Hz, respectivamente (*ver Capítulo 2 Figura 2.5*). El flujo se genera con la apertura de la válvula principal, que representa el proceso más energético con componentes de baja frecuencia (LFC). Esto implica que las componentes MFC y HFC son menos energéticas, aunque son las que están ligadas principalmente con los procesos de descompresión y flujo dentro de la sección de pruebas.

Las velocidades estimadas de las componentes MFC y HFC (usando los primeros arribos del arreglo de sensores piezoeléctricos) son de 1275 m/s y 729.25 m/s, respectivamente. El retraso entre estas componentes es de 0.4 s, lo cual indica que la componente de HFC es más lenta que la de MFC (*ver Figuras 3.2, 3.6, 3.10*). Estas velocidades representan la rapidez de propagación de las ondas a través de la tubería debido al efecto de la descompresión. Los primeros arribos de la componente MFC están relacionados con la onda de choque que se produce por la apertura de la válvula, mientras que la componente HFC está relacionada con la velocidad de propagación de la oscilación producida por el flujo. Con respecto a los experimentos con aire, la componente (LFC) en agua no cambió significativamente, además esta componente es la más energética, y su frecuencia característica se presentó en 0.01 Hz (*ver Figura 3.5, 3.6, 3.7, 3.8*). Las componentes MFC y HFC

presentaron velocidades de 1314.23 m/s para MFC, y 562.45 m/s para HFC; sus frecuencias dominantes están en 150 Hz y 1400 Hz, respectivamente.

En los experimentos con glicerina la tasa de muestreo se redujo un orden de magnitud (50 000 Hz) en comparación con los de aire y agua. Se notó que la forma de onda es diferente a la observada en los experimentos anteriores. Por ejemplo, las velocidades de propagación medidas (considerando los primeros arribos) se redujeron de 1314.23 m/s a 93.22 m/s para MFC, y de 562.72 m/s a 75.92 m/s para HFC. Las frecuencias dominantes son de 20 Hz para MFC, y 80 para HFC. Sólo en este tipo de experimentos las componentes MFC y HFC presentan la misma forma de onda en los diferentes sensores, así como entre diferentes experimentos (*ver Figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12*). Con la idea de evaluar la contribución de la interacción fluido - estructura, las señales experimentales se cotejaron con el modelo numérico CRACSS. Con este modelo se calcularon señales sintéticas usando tres diferentes combinaciones de cilindros (*ver Figuras 4.4, 4.6, 4.10*) con la misma geometría y reproduciendo uno, tres y seis conductos. Entre estos conductos hay una reducción de 1% en el tamaño del radio.

Considerando un solo conducto con flujo de agua, la frecuencia característica es de 1510 Hz y 153 Hz para agua y glicerina respectivamente. En el caso de tres conductos las frecuencias características son de 1510 Hz, 3250 Hz y 41 400 Hz para flujo de agua, y 153 Hz, 250 Hz y 4000 Hz para glicerina. Con seis conductos las frecuencias características son de 1785 Hz, 3250 Hz, 41 400 Hz, y 55 100 Hz para flujo de agua, y 160 Hz, 290 Hz, 3925 Hz y 5510 Hz para flujo de glicerina. Estas diferencias entre frecuencias se deben al contraste entre viscosidades de fluidos, a los cambios en la longitud y en el radio de los conductos. Comparando las señales sintéticas con las señales experimentales que la diferencia en amplitud para flujo de agua, suponiendo que el perfil de velocidad es laminar, es del 20%, mientras que la diferencia en frecuencia es de apenas 5%. En contraste, para flujo de glicerina la diferencia en frecuencia es del 33%, mientras que la diferencia de amplitudes es menor al 10%. La viscosidad del agua dificulta la validación de los resultados numéricos para esta configuración experimental (no cumple con la condición laminar), sin embargo, se logra reproducir la frecuencia característica. Esto implica que, para reproducir resultados experimentales con el modelo numérico se debe adecuar el sistema experimental para controlar los parámetros experimentales y poder asegurar flujo laminar. En los videos observamos principalmente cuatro etapas: la despresurización del sistema, la aceleración del flujo, la penetración del flujo de aire a través de la columna de fluido y la fase bifásica del flujo. El régimen turbulento domina en el experimento con agua ($R_e \gg 4000$) y en el experimento con glicerina domina el régimen laminar

($R_e \ll 2100$), que continúa aún después de la penetración del flujo de aire. Éste empuja la columna del fluido, dada la diferencia de presión, y se expande cuando encuentra la superficie (ver Figuras 3.13, 3.14).

Sincronizados los registros con los videos, se observó que las amplitudes más grandes están relacionadas con el proceso de apertura de la válvula. Por lo tanto es el proceso más energético del experimento. La despresurización dura mientras el aire contenido en el conducto se libera. Posteriormente viene la fase laminar del flujo, y coincide con el decaimiento de la amplitud donde la amplitud se establece en un valor “promedio” (que es distinto entre sensores y entre experimentos) pero sin cambio de frecuencia (1400 Hz para agua y 80 Hz para glicerina). La transición a la fase turbulenta en los experimentos de agua es casi instantánea debido a su baja viscosidad; en contraste, el flujo de glicerina conserva su naturaleza laminar, incluso después de que el flujo de aire entra en el sistema. La penetración del flujo de aire en el fluido viene acompañada por una disminución en las amplitudes de las señales (no mayor a 10%), por variaciones de la forma de onda (señales más prolongadas) y por cambios en la frecuencia (80 Hz para agua y 20 Hz para glicerina). En la componente HFC es más notoria la despresurización, mientras que en la componente MFC se observa la fase turbulenta del flujo y la penetración del flujo de aire (ver Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19). Durante la ejecución de los experimentos de manera aleatoria se presentaron varias variables que contaminaron las señales y que no estaban al alcance de nuestro control. Por ejemplo, el uso de máquinas durante la experimentación, la contaminación por diferentes frecuencias eléctricas, ruido ambiental, cambios de temperatura, etc. Estos factores afectaron las mediciones de una u otra forma, por lo tanto en los futuros experimentos se requiere un estricto control de las variables ambientales. El estudio del flujo en cavidades cobra importancia en muchos ámbitos de la ciencia y la ingeniería, debido a la interacción fluido - estructura causa oscilaciones. En este trabajo se exploró la respuesta elástica de un conducto ante los cambios de las propiedades del fluido. La viscosidad es el parámetro que principalmente las características en frecuencia de la respuesta del sistema. Falta incluir dentro del modelado el efecto derivado de la onda de presión dentro del tubo. Los resultados indican que el modelo CRACSS reproduce las oscilaciones asociadas al flujo dentro del rango de frecuencia 0.01 – 10 000 Hz. También hay que considerar que se requiere perfeccionar el sistema físico experimental para tener mayor control durante la experimentación, así como considerar un espacio adecuado alejado de la contaminación y ruido ambientales (eléctrico, mecánico, cambios temperatura, etc.).

Apéndice A. Piezoelectricidad

Es un fenómeno físico que consiste en la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica; en otras palabras, cuando se deforma un material produce cierta carga eléctrica ó cuando se induce corriente eléctrica al material éste se deformará.

El origen del efecto piezoeléctrico está en la alineación de los dipolos de las estructuras cristalinas de los materiales. Cada dipolo tiene asociado un valor de momento dipolar; los dipolos dentro de la estructura pueden agruparse en dominios y el conjunto de éstos tiene momento dipolar total. Al aplicar un esfuerzo sobre el material, el momento dipolar cambia y produce cierto voltaje. La polaridad del voltaje resultante depende de la dirección del esfuerzo aplicado con respecto a la dirección del vector de momento dipolar.

El efecto piezoeléctrico se describe matemáticamente por el sistema

$$\epsilon_i = S_{ij}^D \sigma_j + g_{mi} D_m \quad (A1)$$

$$E_i = g_{mi} \sigma_i + \beta_{ij}^\sigma D_k \quad (A2)$$

Donde ϵ_i es el vector de deformación, S_{ij}^D es la matriz de coeficientes elásticos con desplazamiento eléctrico constante o Módulo elástico, σ_j es el vector de esfuerzos, g_{mi} es la matriz de constantes piezoeléctricas, D_m es el vector de desplazamiento eléctrico, β_{ij}^σ es el componente de impermitividad y E_i es el vector de campo eléctrico. Este sistema de ecuaciones lineales gobierna el acoplamiento electromecánico a voltajes muy bajos; no se cumple en alto voltaje debido a que el comportamiento no es lineal.

Las propiedades piezoeléctricas pueden ser inherentes del material o pueden adquirirse a través de un proceso llamado Polinización: el material se pulveriza, se mezcla con una cobertura orgánica y se

calienta a determinada temperatura para obtener una estructura cristalina definida; cuando el material se somete a una temperatura ligeramente abajo del punto de Curie (temperatura umbral a la cual los materiales adquieren propiedades piezoeléctricas) se le aplica un campo eléctrico en DC. Los dipolos previamente alineados aleatoriamente se alinearán con el campo eléctrico externo; al remover el campo eléctrico la polarización permanente del material será la polarización remanente y además sus dimensiones cambian en el orden de micras de metro (Moheimani & Fleming, 2006).

Existen varios tipos de materiales: cerámicos, fluoruro de polivinilideno (PVDF), copolímeros, entre otros. En la tabla 1 se resume las propiedades principales de cada material (Measurements Specialties, Inc., 1999).

| Property | Units | PVDF Film | PZT | BaTiO ₃ |
|-----------------------|---|-----------|-------|--------------------|
| Density | 10 ³ kg/m ³ | 1.78 | 7.5 | 5.7 |
| Relative Permittivity | ϵ/ϵ_0 | 12 | 1,200 | 1,700 |
| d_{31} Constant | (10 ⁻¹²)C/N | 23 | 110 | 78 |
| g_{31} Constant | (10 ⁻³)Vm/N | 216 | 10 | 5 |
| k_{31} Constant | % at 1 KHz | 12 | 30 | 21 |
| Acoustic Impedance | (10 ⁶)kg/m ² -sec. | 2.7 | 30 | 30 |

Tabla A.1. Comparación entre algunas propiedades de los materiales piezoeléctricos. Tomada del manual de Measurements Specialties, Inc., 1999.

Los piezoeléctricos de Fluoruro de Polivinilideno (PVDF), descubiertos en 1969, son sensores construidos a partir de un plástico ingenieril polarizado resistente, ligero y flexible (Figura 1). Las dimensiones pueden ser variables, dependiendo del uso, y presenta características como (Measurements and Specialties Inc., 1999):

- Enorme rango de frecuencias (10⁻³ – 10⁹ Hz).
- Baja impedancia acústica
- Amplio rango dinámico (10⁻⁸ – 10⁶ psi)
- Material elásticamente competente

- Estable, entre otras características. Para ciertas aplicaciones presentan desventajas como (Measurements and Specialties Inc., 1999):
- No puede usarse para temperaturas mayores a 100oC
- Es débil transmisor electromecánico en muy baja frecuencia
- Si los electrodos (extremos de conexión) no están aislados, pueden contaminarse con radiación electromagnética.

Bibliografía

Arciniega-Ceballos, A., M. Alatorre-Ibargüengoitia, B. Scheu, and D.B. Dingwell (2015), Analysis of the source characteristics of experimental gas burst and fragmentation explosions generated by rapid decompression of volcanic rocks, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, doi:10.1002/2014JB011810.

Arciniega-Ceballos, A., M. Alatorre-Ibargüengoitia, B. Scheu, D.B. Dingwell, and H. Delgado-Granados (2014), Seismological analysis of conduit dynamics in fragmentation experiments, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, doi:10.1002/2013JB010646.

Bathe, K. J., 1988. Fluid-structure interactions. *Mechanical Engineering*, 120, 4, pp 6.

Balmforth, J.N., Craster, R.V. & Rust, A.C. (2005). Instability in conduits and volcanic tremor. *Journal of Fluid Mechanics*, 527, 353 – 377.

Bazilevs, Y., Calo, V. M., Zhang, Y., Hughes, T. J. R., 2006. Isogeometric fluid-structure interaction analysis with applications to arterial blood flow. *Comput. Mech.* 38: 310 - 322, DOI 10.1007/s00466-006-0084-3.

Chouet, B., (1985). Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor. *Journal of geophysical research*, 90, 1881 – 1893.

Chouet, B., 1996. Long period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380, 309-316.

Corona-Romero P., A. Arciniega – Ceballos., F.J. Sánchez – Sesma (2012) Simulation of LP seismic signals modeling the fluid-rock interaction. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.09.002.

Glycerine Producers' Association (1963). Physical properties of glycerine and its solutions. Glycerine Producers' Association. 27 páginas.

James, M. R., Lane, S. J., Chouet, B. A. (2006). Gas slug ascent through changes in conduit diameter: Laboratory insights into a Volcano-seismic source process in low-viscosity magmas. *Journal of Geophysical Research* 111(B05201), doi:10.1029/2005JB003718.

Julian, B. (1994). Volcanic tremors: nonlinear excitation by fluid flow. *Journal of Geophysical Research* 99 (B6), 11,859 – 11,877. Landau, L.D. & Lifshitz, E.M. (1966). *Fluid Mechanics*. (Third Edition). London: Pergamon Press.

Le Tallec, P., Mouro, J. (2001). Fluid structure interaction with large structural displacements. *Computational Methods Applied Mechanical Engineering*, 190, 3039 – 3067.

Munson, B.R., Okiishi, T.H., Young, D.F. (2002). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. USA: John Wiley & Sons, Inc. Fourth Edition.

Nishimura, T., Chouet, B. (2003). A numerical simulation of magma motion, crustal deformation and seismic radiation associated with volcanic eruptions. *Geophysical Journal International* 153, 699-718.

Piezo Film Sensors Technical Manual REV B 02, Measurements Specialties Inc., Norrrington, PA, 1999.

Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K. (2004). *Física: Volumen 1*. (4ta ed.). México: Compañía Editorial Continental.

Smits, A.J. (2017). *A Physical Introduction to Fluid Mechanics*. Princeton University. Second edition.

Tijsseling, A.S (1996). FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN LIQUID - FILLED PIPE SYSTEMS: A REVIEW. *Journal of Fluids and Structures* 10, 109 – 146.

Vargaftik, N. B., Filippov, L. P. Tarzimanov, A. A., & Totskii, E. E. (1993). *Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases*. London: CRC Press.