

SIMULACIÓN DE GASES A PARTIR DE SISMOS VOLCÁNICOS TIPO TORNILLO
POR MEDIO DEL RESONADOR DE HELMHONTZ, UN ACERCAMIENTO HACIA
LAS VARIABLES DE PRESIÓN, TEMPERATURA Y LOS FENÓMENOS
ONDULATORIOS.

Trabajo de grado para obtener el título profesional de Licenciado en Física


AUTOR
MAURICIO GONZÁLEZ HIDALGO
CÓDIGO 2011146031

DIRECTOR
VÍCTOR HEREDIA

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FISICA
LINEA DE PROFUNDIZACION:
ENSEÑANZA DE LA FISICA DESDE LA RELACION FISICA MATEMATICA**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi familia en especial a mi señora Madre Cecilia, la que siempre me ha apoyado en todos mis proyectos, que este logro le dé ánimos para seguir luchando, En segundo lugar a los profesores de la línea “ENSEÑANZA DE LA FISICA DESDE LA RELACION FISICA MATEMATICA” su apoyo al trabajo en especial a su coordinador el profesor Mauricio Rozo y a mi asesor el profesor Víctor Heredia por sus recomendaciones, En tercer lugar a los funcionarios del Servicio Geológico Colombiano en especial a la Doctora Claudia Indira Molina por sus consejos y ayuda, al ingeniero Roberto Torres del Observatorio Vulcanológico de Pasto por su amistad, al físico Nelson David Pérez García por sus observaciones En cuarto Lugar a los profesores de la Universidad Nacional De Colombia, Jhon Jairo Sánchez por sus aportes, a la profesora María Cristina Dimate por sus clases de sísmica, En quinto lugar a la doctora Margaret Hellweg de la Universidad de Berkeley por sus aportes al trabajo, Por ultimo Agradecer a los estudiantes del curso de ecuaciones diferenciales del departamentos de Física de la UPN, a mis amigos y compañeros de la Universidad que siempre me han apoyado, agradecer también a Miguel Lisarazo por compartir su visión sobre la vulcanología y a una persona muy especial, la cual me ha impulsado a seguir mi pasión, la geología, Sandra Julieth Castaño Peña.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Construyendo la Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página iii de 108	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Simulación de gases a partir de sismos volcánicos tipo tornillo por medio del resonador de HELMHONTZ, un acercamiento hacia las variables de presión, temperatura y los fenómenos ondulatorios
Autor(es)	González Hidalgo, Mauricio
Director(es)	Heredia Heredia , Víctor Andrés
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2017, 60p
Unidad Patrocina te	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	VOLCANES, SÍSMICA VOLCÁNICA, SISMOS TORNILLO, CAVITACIÓN, SISTEMAS ADIABÁTICOS, VELOCIDAD DEL SONIDO, NUMERO DE MATCH, RESONADOR DE HELMHONTZ, SIMULACIONES Y MODELAMIENTOS, MATLAB, EVALUACIÓN DE SOFTWARE EDUCATIVO, TRANSFORMADA DE FOURIER.

2. Descripción
<p>Este trabajo consiste en explicar, a partir del modelo de Helmhontz, cómo es el comportamiento de la onda tornillo y su relación con la dinámica de fluidos que hay al interior de un conducto volcánico. Después de esto, teniendo en cuenta las propiedades acústicas de los gases que están presentes en los volcanes de Chouet & Kumagai (2000) se desarrolló un programa en matlab en formato GUI. Este programa simula el comportamiento de estos fluidos de forma ideal. Por último el simulador se implementó en el curso de ecuaciones diferenciales del departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional</p>

3. Fuentes

- Cabrero Fraile, F. J., Sánchez Llorente, J. M., Sánchez García, A. B., Borrajo Sánchez, J., Rodríguez Conde, M. J., Cabrero Hernández, M., & Juanes Méndez, J. A. (2010). SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura*, 46-74.
- AAraujo, S. (2012). Modelo de Fuente Sísmica Para El Tremor Volcánico Basado En La Turbulencia Elástica del Magma Andesítico y El Lodo Volcánico. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*.
- Armijo, J. (2005). FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES A TRAVÉS DE TUBOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE: ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA GASES IDEALES. *Revista Peruana de Ingeniería Química*, 1-9.
- Atares Huerta, L. (2010). *Fracción másica y fracción molar*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Australian, G. (2 de 4 de 2016). *Applying geoscience to Australia's most important challenges*. Obtenido de <http://www.ga.gov.au/hazards/volcano/>
- Balderas Puga, A. (2011). Didáctica de las Ecuaciones Diferenciales y Tecnología Informática: El Caso de la Modelación. *ASOCIACIÓN MEXICANA DE INVESTIGADORES DEL USO DE LA TECNOLOGÍA EN EDUCACIÓN MATEMÁTICA*, 35-50.
- Bullen, K. E., & Bold, B. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Great Britain: Cambridge University Press,.
- Burbano de Ercilla, S., Burbano García, E., & Gracia Muñoz, C. (2005). *Física General*. Madrid: Tebar.
- Cala Vitery, F. (3 de 04 de 2016). *Universidad Jorge Tadeo Lozano*. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Cataldi, Z., Lage, J. F., & Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 8-16.
- Cengel, Y., & Boles, A. M. (2012). *Termodinámica*. New York: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. Pennsylvania: Mc Graw Hill.
- Chouet, B. (1985). Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference

method. *Journal of Geophysical Research*, 13967-13992.

Chouet, B., & Kumagai, H. (2000). Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical research*, 25-45.

Definición de la Transformada de Fourier. (7 de 6 de 2017). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=-xm6zS8ZXSX>

Duitama Leal, A. (2013). *Simulación de la Atenuación de Frecuencias en Ondas Sísmicas Primarias*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Dullius, M. M. (2009). *Enseñanza y Aprendizaje de las Ecuaciones Diferenciales con Abordaje Gráfico, Numérico y analítico*. Burgos: Universidad de Burgos.

Dutrimon, C. (2014). *Étude de faisabilité d'un revêtement élastique pour la furtivité acoustique*. Toulouse: Université de Toulouse .

Elmo. (29 de 9 de 2016). *Qué es Las TIC en educación*. Obtenido de <http://www.elmoglobal.com/es/html/ict/01.aspx>

Fazio, M. (2017). *DYNAMIC LABORATORY SIMULATIONS OF FLUID-ROCK COUPLING WITH APPLICATION TO VOLCANO SEISMICITY AND UNREST*. Portsmouth: University of Portsmouth.

Giancoli, D. (2014). *PHYSICS PRINCIPLES WITH APLICATIONS*. New York: Pearson.

Gomez, D. M., Torres, R. A., & Narvaez, L. (1996). *Unusual seismic signal associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, From July 1992 to September 1994*. Roma: ANNALI DI GEOFISICA.

Gomez, D. M., Torres, R. A., Seild, D., Hellweg, M., & Rademacher, H. (1999). *Tornillo seismic events at Galeras Volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements* . Roma: Annali di Geofisica.

Gonzalez, e. (4 de Noviembre de 2017). *Grupo de Investigación: "Geomorfología Territorio y Paisaje en Regiones Volcánicas"*. Obtenido de Geovol: <https://previa.uclm.es/profesorado/egcardenas/magma.htm>

Gonzalez, S. (2008). *propriétés acoustique et électriques du grès de Berea*. Quebec: Université du Québec.

Hazlet, R., & Lockwood, J. (2010). *Volcanoes global perspective*. New York: Wiley-Blackwell.

Hellweg, M. (1999). Physical Models for the source of Lascar's harmonic Tremor. *Elsevier*, 183-198.

Hellweg, M., & Seild, D. (2003). *Parameterization of multichromatic tornillo signals observed at Galeras volcano (Colombia)*. Berkeley: Elsevier.

Hoeger, H. (2007). *Simulación*. Merida: Universidad de Los Andes.

- Howe, M. S. (1976). ON THE HELMHOLTZ RESONATOR. *Journal of Sound and Vibration*, 427-440.
- Ibañez, J. M., & Carmona, E. (1997). *Sismicidad Volcanica*. Granada: Instituto Andaluz de Geofísica.
- Instituto Superior de Correlacion Geologica CONICET. (14 de 11 de 2016). *Capitulo 4. Volcanismo*. Obtenido de http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/04.htm
- Keller, E. A., & Blodgett, R. H. (2004). *Riesgos Naturales, Procesos de la Tierra Como Riesgos, Desastres y Catastrofes*. Madrid: Pearson.
- Kofman, H. A. (2005). MODELOS Y SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA FISICA. *Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral Santiago del Estero 2829, (3000) Santa Fe, República Argentina*.
- Konstantinou, K. I. (2015). *Tornillos modeled as self-oscillations of fluid filling a cavity: Application to the 1992–1993 activity at Galeras volcano, Colombia*. Taiwan: Elsevier.
- Kumagai, H., Chouet, B., & Nakako, M. (2002). Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 1-9.
- Kusky, T. (2008). *Volcano Eruption and Other Volcanic Hazard*. New York: Fact on File.
- Laboratorio de procesamiento de imagen. (21 de 9 de 2016). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de <https://www.lpi.tel.uva.es/>
- Laurents, S., & Tordeux, S. (2012). Lower and upper bounds for the Rayleigh Conductivity of a perforated plate. *Archives Ouvertes*, 1-20.
- Lizaraso Calderon, M. J. (2013). *Relocalizacion de Sismos Volcano-Tectonicos en el Volcan Galeras a partir de correlacion cruzada de forma de onda*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Macias Vazquez, J. L., & Capra, P. L. (2005). *LOS VOLCANES Y SUS AMENAZAS*. Mexico: Fondo de Cultura Economica.
- MADER, H. D., COLES, S. H., CONOR, C. B., & CONOR, L. J. (2006). *STATISTICS IN VOLCANOLOGY*. LONDON: THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON.
- Maricer, M. (2009). Capturando la física de los resonadores Helmholtz. *dialnet*, 1-8.
- Mayorga, E., & Poveda, A. (2013). *ANÁLISIS GRÁFICO Y NUMÉRICO EN LA INTERPRETACIÓN DE UNA SEÑAL SISMOLÓGICA: TEMÁTICAS DE LA FÍSICA DE ONDAS IMPLICADAS EN UN SISMO*. Bogota: Universidad Pedagógica Nacional.
- Molina Mora, J. A. (2015). *Experiencia basada en la triada TICS, Enseñanza por proyectos y modelado para las ecuaciones diferenciales*. Costa Rica: Escuela de Matemáticas, Universidad de Costa Rica.
- Montesinos, L. (14 de 11 de 2016). *Teach with blendspace*. Obtenido de

<https://www.tes.com/lessons/stiYBtTWqSlf4Q/tema-1-el-sonido>

- Montoya, C. (2010). Utilización de las TICs en la enseñanza de las Ciencias. *II congreso internacional de didactique* (págs. 1-6). Paris: Universitat de Girona.
- Observatorios sismológicos y vulcanológicos . (14 de Julio de 2016). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de <http://www2.sgc.gov.co/Observatorios-Vulcanologicos/Metodologia-para-la-vigilancia-volcanica.aspx>
- Ortegon, M. R. (2002). *Diseño su interfaz grafica con MATLAB*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Perez, G. N. (2014). *Características de Fuentes sísmicas de eventos tipo tornillo en el volcán Purace mediante el análisis de frecuencias complejas*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Ramon, F. (27 de Marzo de 2015). *Ingeniería de Sonido*. Obtenido de <http://www.equaphon-university.net/resonador-de-helmholtz/>
- Rosero Rueda, S. (2016). *ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN Y ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA* . Bogota: Universidad Pedagógica Nacional.
- Sanabria, H. A. (2014). *ESTUDIO DE LA PRECISIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN TUBO DE IMPEDANCIA* . Madrid: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.
- Sanchis, E. (2004). *FUNDAMENTOS Y ELECTRONICA DE LAS COMUNICACIONES*. VALENCIA: UNIVERSITAT DE VALENCIA.
- Sauter, F. (1989). *Introducción a la Sismología*. Costa Rica: EDITORIAL TECNOLÓGICA DE COSTA RICA.
- Selesnick, L. W. (2011). Resonance Based Signal Descomposition: A new sparsity-enabled Signal Analysis Methods. *Signal Process*, 2793-2809.
- Serway, R., & Beichner, R. (2000). *FISICA PARA LAS CIENCIAS E INGENIERIAS* . Mexico: Mc Graw Hill.
- Tapia, C. (2002). *SISTEMAS, MODELOS Y SIMULACION*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
- Tarbuk, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson.
- Tary, J. B., Van der Ban, M., Sutherland, B., & Eaton, D. W. (2014). Characteristics of fluid-induced resonances observed. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-13.
- The Boeing Company. (1968). *Bulk Modulus investigation Hidraulyc Fluid*. Wasington: Comercial Airplane Division.
- Torres, R. A., Gomez, D. M., Ortega E, A. M., & Seidi, D. (2002). *Señales Sísmicas Tornillo*. Bogota:

Universidad Nacional de Colombia .

Universidad de Almeria. (7 de 6 de 2017). *Teoria de Señales*. Obtenido de <https://w3.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Signals/Theory/index.html>

Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (2008). *Fundamentos de Termodinamica*. Mexico: Limusa S.A.

White, F. M. (1983). *Mecanica de Fluidos*. Mexico: Mac Graw Hill.

Zellmer, G. F., & Annen, C. (2008). *An Introduction to Magma Dynamic*. London: Geological Society, London, Special Publications.

Zobin, V. M. (2003). *INTRODUCTION TO VOLCANIC SEISMOLOGY*. Colima: Elsevier.

4. Contenidos

El primer capítulo desarrolla el concepto de volcán, sus partes y su clasificación por el tipo de erupción, luego se explica un método de vigilancia como es la sismología; desde ahí se habla de las diversas señales sísmicas que se generan en los volcanes. Entre estas señales se encuentran las de tipo Tornillo, junto con la interpretación que se hace de la forma de onda de esta señal a través del resonador de Helmholtz. Ahora, en el segundo capítulo se exponen los sistemas adiabáticos en los gases, de donde se explica el módulo de elasticidad en estos para hablar sobre las ondas sonoras y su comportamiento. Una forma de describir estas perturbaciones es a través del resonador de Helmholtz. Posteriormente, se explica el funcionamiento del resonador, sus partes, y el comportamiento de las ondas dentro del dispositivo.

El tercer capítulo trata la definición e importancia de las simulaciones y los modelamientos en el estudio de los fenómenos físicos. A partir de esto se hace una descripción del modelo que permite comparar la onda tornillo con la del resonador, el cual se utilizará para desarrollar el simulador. Este se detalla a continuación: estos, tanto la onda como el resonador, se hicieron con el software conocido como Matlab; después se hace una explicación sobre la importancia del software educativo, sus alcances y evaluación. Por último se explica en que consiste el módulo de implementación, sus objetivos y alcances. Finalmente, el cuarto capítulo se refiere que a partir de la modelación de la ecuación de Helmholtz se genera un sismo sintético el cual se contrasta con una señal de un sismo tornillo observado en el VG. También se comparan los tiempos de finalización de la señal y sus codas. Desde el modelo anteriormente nombrado se da una explicación física al comportamiento del gas en un conducto volcánico. Luego, se hace un análisis de los resultados del programa que se implementó en el curso de ecuaciones diferenciales el día 21 de Noviembre de 2017

5. Metodología

La metodología que se desarrolló para este trabajo fue una revisión bibliográfica de artículos en los cuales se habla sobre una relación entre el resonador de Helmholtz con el sismo tornillo generado en un volcán, en la siguiente etapa teniendo en cuenta las condiciones del gas y el modelo de Helmholtz planteado por (Hellweg & Seild, 2003) y se recrea una simulación de esas condiciones, para compararlo con un sismo observado, después de probado el modelo matemático, la siguiente etapa fue el diseño de la simulación en Matlab a partir de las propiedades termodinámicas de los gases volcánicos planteadas por (Chouet & Kumagai, 2000), luego se diseña un módulo y se evalúa la interfaz en el grupo de Ecuaciones Diferenciales del departamento de física de la Universidad Pedagógica Nacional

6. Conclusiones

- El modelo del resonador de Helmholtz permite describir ondas sísmicas volcánicas de largo periodo de tipo tornillo, este es un modelo que permite explicar el comportamiento de las burbujas de gases al interior de un conducto volcánico, además genera unas posibles dimensiones del resonador que describen ese tipo de ondas. Ahora la importancia que tiene esta señal tiene que ver con un fenómeno particular que sucede en las burbujas conocido como cavitación, la cual está al aplastarse, golpea las paredes del tubo por donde recorre la burbuja, dejando una fisura en este, luego, dependiendo a la sísmica histórica del aparato volcánico, los observatorios vulcanológicos determinan a partir de ese sismo cual es la probabilidad que se rompa el tubo por donde viaja la burbuja y genere una erupción volcánica, de ahí es un indicador por el cual se generan las alertas.
- El modelo de Helmholtz de Cavidad permite describir el comportamiento elástico de los gases y las mezclas binarias de estos como es el caso de la mezcla para comparar el modelo de Helmholtz con el sismo observado, estableciendo una analogía con un sistema masa resorte con las partes del resonador.
- Las interfaces graficas de usuario (GUI) en Matlab permiten desarrollar gráficas y modelaciones de ecuaciones diferenciales de una forma mucho más sencilla, esto debido a que el software posee funciones propias que permiten resolver en este caso Ecuaciones Diferenciales y graficarlas de manera sencilla y no es necesario desarrollar la rutina para el método numérico.
- Es importante hacer una evaluación del software que se vaya a realizar en el aula a los

estudiantes, ya que estos son que van a utilizar esta herramienta computacional , esto puede mostrar que fallas puede tener el programa en cuanto al diseño y la forma de este, para este trabajo el diseño de la interfaz mostro sus debilidades en cuanto al color de fondo del programa como al tamaño de la fuente, también mostro sus fortalezas en cuanto a la calidad de los gráficos con un 61.9 % de la población afirmo que era muy adecuada, la distribución de los objetos saco un 33 % en ese ítem y otro 33 % en adecuada , Ingreso de valores obtuvo un 42 % en la calificación de bastante adecuada y salida de resultados el 52% de los estudiantes afirman que bastante adecuada, es decir cuatro de seis ítems que se evaluaron salieron con una muy buena calificación, Ahora en cuanto a las sugerencias que dieron los usuarios para mejorar el simulador cabe destacar la sugerencia que dio la estudiante Andrea Vargas sobre el color del fondo del uso de colores tierra (café, gris...).

-En cuanto a la implementación del módulo, la primera actividad la contestaron los ocho grupos, comparando el comportamiento de las variables modificadas para los casos sugeridos, en cuanto a la segunda actividad del módulo, el 85 % de los grupos la respondieron el primer punto, de ahí el 52 % dibujo el resonador de una manera aproximada con la información generada con el programa, Ahora en la descripción de los cambios en resonador el 71% de los estudiantes dieron una respuesta aceptable, es decir una respuesta cercana a los cambios del resonador, el 14.28 % se aproximaron bastante a descripción que se vio en la tabla 4.2 . Es decir se cumplió el segundo resultado esperado del módulo pero no de la manera deseada. Siguiendo con el orden de ideas para el segundo punto, el 57.14% de los grupos desarrollaron la actividad, de esa muestra el 25% contesto de manera cercana a lo que se buscaba, mientras que el 50% contesto de manera aceptable, es decir la primera meta del módulo se cumple de manera muy parcial. y finalmente el 75 % desarrollo muy bien la última actividad.

-Las simulaciones permiten acercarse a fenómenos que no son muy fáciles de recrear en laboratorio y son una buena herramienta a la hora de enseñar tanto en un curso de ecuaciones diferenciales, como uno de termodinámica o de ondas siempre y cuando vaya acompañado de una parte experimental, esto con el fin que el estudiante pueda materializar

Elaborado por:	Gonzalez Hidalgo Mauricio
Revisado por:	Heredia Heredia Victor

Fecha de elaboración del Resumen:	20	08	2018

Contenido

Tabla de Figuras	xiv
Introducción	1
Planteamiento del problema	3
Justificación.....	4
Objetivos	5
Antecedentes	6
Capítulo I– Los volcanes: un acercamiento a la geodinámica interna del planeta	7
1.1 Volcán	7
1.2. Sísmica Volcánica.....	9
1.2.1 Tremor Volcánico	10
1.2.2 Sismos Vulcano-Tectónicos.....	11
1.2.3 Sismos de Largo Periodo (LP).....	12
1.2.3.1 Sismo Tornillo.....	12
Capítulo 2 – Las Ondas Sonoras y su Relación con el Resonador.....	15
2.1 Procesos Adiabáticos del Gas	15
2.2 Modulo de Bulk.....	17
2.3 Las ondas sonoras y su relación con la velocidad del sonido.....	18
2.4 Resonador de Helmholtz	21
Capítulo 3 – Sobre la simulación y su relación con la enseñanza	27
3.1 Simulación Y Modelización.....	27
3.2 Composición del Modelo	29
3.3 El simulador	31
3.4 Software Educativo y su evaluación	34
3.6 Modulo	36

3.6.1	Objetivos del Modulo.....	36
3.6.2	Descripción del Modulo	36
3.6.3	Resultados esperados.....	37
Capítulo 4.	Análisis y resultados	38
4.1	Comparación del sismo Tornillo con la señal generada del modelo de Helmhontz.....	38
4.2	Resultados de la implementación	42
4.2.1	Resultados de la evaluación del SW.....	42
4.2.2	Resultados sobre la interpretación del programa	44
	Conclusiones	49
	Bibliografía	51
Anexo 1	.....	58
	Transformada de Fourier.....	58
Anexo 2	.....	61
	Teorema de Parseval y la densidad espectral de potencia.....	61
Anexo 3	.....	63
	Deducción de la expresión de trabajo para un gas	63
Anexo 4	.....	65
	Desarrollo de la simulación	65
Anexo 5	.....	70
	Propiedades termodinámicas de los gases (Chouet & Kumagai, 2000).....	70
Anexo 6	.....	71
	Programa en matlab 2014 que simula el sismo sintético a partir del modelo de Helmhontz	71
Anexo 7	.....	72
	Formulario de Evaluación del Software.....	72
Anexo 8	.....	73
	Módulo de Implementación	73
Anexo 9	.....	84
	Código del simulador desarrollado en matlab 2014	84

Tabla de Figuras

1,1. Estructura interna de un volcán	9
1,2 Tremor Volcánico. a- Sismograma de tremor en su dominio del tiempo, B-diagrama de frecuencias del sismo c- Concentración de máximos picos de frecuencia	10
1,3 Señal asociada a un sismo VT originada en el VG, registrado en la estación UREW. (a) Forma de onda del sismo en el dominio del tiempo, (b) Espectro de energía de la señal (c) Espectro de frecuencia de la señal	11
1,4 Sismograma de un evento de largo periodo (LP) registrado en el volcán Purace en el dominio del tiempo. Abajo los espectros de frecuencia;	12
1,5 (a) Dominio del tiempo de la señal del Sismo Tornillo, (b) Dominio de la frecuencia onda(c) espectro de energía de la señal	13
1,6 (a) ilustración que muestra la geometría del resonador de cavidad (b) Diagrama del comportamiento de la burbuja recorriendo un tubo de longitud l.....	14
2,1 (a) Esquema de un proceso de tipo adiabático en un gas, (b) Comportamiento de un gas que está confinado al interior de un envase que está aislado térmicamente	16
2,2. Propagación de una onda de presión a lo largo de un volumen de control	19
2,3. Esquema de un tubo abierto, en estos dispositivos se evidencia que sus extremos no están cerrados (Laboratorio de procesamiento de imagen, 2016)	22
2,4 (a)Esquema de funcionamiento del resonador (b) diagrama de la cavidad del dispositivo antes que este se llene de aire y luego que este se llena, (c) diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que interactúan alrededor del cuello (d) Esquema del comportamiento de la masa de gas al interior del resonador antes que la masa de gas se desplace al interior del resonador (e) descripción del movimiento de la columna de gas sobre el cuello cuando llega al otro extremo	25
2, 5 Representación gráfica de la definición de factor de calidad Q	26
3, 1 Elementos Básicos y relaciones en modelización y simulación Fuente El autor	28
3,2 (a) interfaz que representa la señal de un gas con sus respectivos selectores de presión, temperatura y Gases, botones que generan la señal y los resultados, con su respectivo ingreso de datos de radio de resonador y frecuencia (b) simulación de un gas con una mezcla binaria, (c) simulador de dos mezclas.	33
4,1 (a) sismo tornillo observado en el VG. (b) Sismo sintético generado con la frecuencia observada de 1.82 Hz, modelado a partir del modelo de Helmhontz. (c) Sismo sintético	

generado a través de un oscilador no lineal de Van der Pool con una frecuencia de 1.5 Hz con un μ de 0.25 .	39
4,2 (a) Sismo sintético generado con el modelo de van der pool con un $\mu = 0.25$, (b) Sintético creado con el mismo modelo con $\mu = 0.5$ (c) Sintético Generado con el modelo de Helmhontz Fuente el Autor.	40
4,3 Proceso de cavitación de una burbuja de vapor, la cual al aplastarse golpea la pared del tubo generando una fisura dentro de este.	41
A, 1,1 Representación de una señal continua	59
A, 2,2 (a) Grafica de la función coseno en el dominio del tiempo, (b) grafica en el dominio de la frecuencia (Universidad de Almeria, 2017)	60
A 5,1 Esquema del resonador de Helmhontz donde se representa la fuerza que ejerce uno de sus extremos la masa oscilante de gas.	66

Introducción

Los volcanes son estructuras geológicas que muestran los procesos de transferencia de calor del interior al exterior de la superficie terrestre. Esta interacción genera las erupciones volcánicas que han provocado pérdidas materiales y humanas como sucedió en el derrumbe que sepultó a Armero, Tolima el 13 de Noviembre de 1985; esta avalancha fue formada por la erupción del Nevado del Ruiz. Después, en 1989 comienza el resurgimiento de la actividad del Volcán Galeras (VG). A partir de ese momento, se comenzó a monitorear la actividad volcánica tanto desde la geoquímica como la sismológica. Esta última encontró que hay una onda sísmica particular que explica cómo es el comportamiento de los fluidos al interior del cono volcánico. Esta señal se denomina tornillo porque su forma de onda es muy similar a una rosca golosa (Torres, Gomez, Ortega E, & Seidi, 2002) y esta tiene un decaimiento de su señal cuasi lineal. Ahora bien, estos sismos poseen una particularidad y es que a través de estos se monitorea la actividad sísmica precursora previa a las erupciones volcánicas (Fazio, 2017). Por otro lado, diversos investigadores como Hellweg & Seild (2003); Gómez, Torres, Seild, Hellweg & Rademarcher (1999); Konstantinou (2015); Gómez, Torres & Narváez (1996) afirman que los tornillos del VG se pueden describir como las ondas generadas por un resonador de Helmholtz. Es así como este volcán se toma como referente, debido a que es el más estudiado en Colombia, y por tanto se tiene más información, aparte de que es uno de los más activos del país.

En lo que respecta a este trabajo, cabe mencionar que consiste en explicar, a partir del modelo de Helmholtz, cómo es el comportamiento de la onda tornillo y su relación con la dinámica de fluidos que hay al interior de un conducto volcánico. Después de esto, teniendo en cuenta las propiedades acústicas de los gases que están presentes en los volcanes de Chouet & Kumagai (2000) se desarrolló un programa en matlab en formato GUI. Este programa simula el comportamiento de estos fluidos con condiciones ideales. Por último, el simulador se implementó en el curso de ecuaciones diferenciales de la UPN. A continuación se describen los capítulos en los que se desarrolla esta investigación.

El primer capítulo desarrolla el concepto de volcán, sus partes y su clasificación por el tipo de erupción, luego se explica un método de vigilancia como es la sismología; desde ahí

se habla de las diversas señales sísmicas que se generan en los volcanes. Entre estas señales se encuentran las de tipo Tornillo, junto con la interpretación que se hace de la forma de onda de esta señal a través del resonador de Helmholtz. Ahora, en el segundo capítulo se exponen los sistemas adiabáticos en los gases, de donde se explica el módulo de elasticidad en estos para hablar sobre las ondas sonoras y su comportamiento. Una forma de describir estas perturbaciones es a través del resonador de Helmholtz. Posteriormente, se explica el funcionamiento del resonador, sus partes, y el comportamiento de las ondas dentro del dispositivo.

El tercer capítulo trata la definición e importancia de las simulaciones y los modelamientos en el estudio de los fenómenos físicos. A partir de esto se hace una descripción del modelo que permite comparar la onda tornillo con la del resonador, el cual se utilizará para desarrollar el simulador. Este se detalla a continuación: estos, tanto la onda como el resonador, se hicieron con el software conocido como Matlab; después se hace una explicación sobre la importancia del software educativo, sus alcances y evaluación. Por último se explica en que consiste el módulo de implementación, sus objetivos y alcances. Finalmente, el cuarto capítulo se refiere que a partir de la modelación de la ecuación de Helmholtz se genera un sismo sintético el cual se contrasta con una señal de un sismo tornillo observado en el VG. También se comparan los tiempos de finalización de la señal y sus codas. Desde el modelo anteriormente nombrado se da una explicación física al comportamiento del gas en un conducto volcánico. Luego, se hace un análisis de los resultados del programa que se implementó en el curso de ecuaciones diferenciales el día 21 de Noviembre de 2017

Planteamiento del problema

En el curso de Ecuaciones Diferenciales (ED) de la UPN se pudo evidenciar que no se muestran otro tipo de modelamientos físicos de las ED de segundo orden que relacionen el comportamiento de los gases. Ahora, estas por su metodología de enseñanza *fuertemente orientada hacia la solución analítica, generan un aprendizaje mecánico, sin que el alumno perciba su potencial y su importancia como una herramienta matemática para resolver problemas prácticos* (Dullius, 2009, pág. 1). Por ese motivo muchos autores, como Molina Mora (2015) y Dullius (2009) , afirman que es importante la incorporación de los modelos computacionales a la hora de la enseñanza, en este caso las ED, porque estos permiten más la interpretación de la solución de las ED y sus procedimientos a la hora de representar un evento físico; luego, estos sucesos tienen una estrecha relación con los fenómenos que pasan en el entorno (Vanegas Casallas, 2016) , más aún en Colombia que es una zona geológicamente activa, con más de 25 volcanes que son monitoreados por tres observatorios vulcanológicos, los cuales generan información de cómo es el comportamiento interno de estas estructuras geológicas. Esto se evidencia en sus informes que se habla de la sísmica relacionada con movimiento de fluidos.

Como se ha dicho, para estudiar el comportamiento de los gases en un volcán se debe tener en cuenta que se comportan de forma real. Esto significa que para acercarse al comportamiento ideal de estos gases se recurre a ciertas condiciones de presión y temperatura que no se pueden recrear en laboratorio. Por ese motivo se recurren a las simulaciones computacionales debido a que estas permiten aproximarse a fenómenos complejos, inaccesibles, peligrosos, extremadamente lentos o extremadamente rápidos y observar los efectos de la modificación a voluntad de parámetros. Lo anterior admite distintos grados de intervención del usuario, que puede manipular algunas de las condiciones “experimentales” (valores iniciales y parámetros que afectan al modelo) y observar distintas variaciones del fenómeno a través de animaciones, gráficos y/o resultados numéricos (Raviolo, 2012).

Finalmente, es importante que los estudiantes del departamento de física de la UPN conozcan otro tipo de aplicaciones de las ecuaciones diferenciales de segundo orden, ya que estas pueden describir fenómenos físicos; en especial, el comportamiento elástico de las ondas acústicas longitudinales teniendo como foco las generadas en un complejo volcánico, por tanto la pregunta problema es:

-¿Cuáles son las consideraciones físicas en el estudio de una onda sísmica volcánica de largo periodo de tipo tornillo, que se deben tener en cuenta al compararlos con una onda generada con el modelo matemático del resonador de Helmholtz en el estudio de las ondas al encerrarlas en un contenedor?

Justificación

Al examinar una serie de investigaciones alrededor de una relación entre los volcanes y la física que se pueden llevar al aula y al hacer dicha revisión en una consulta de trabajos de grado de la licenciatura en física de la UPN, se observó que el departamento no cuenta con investigaciones en esa área del conocimiento. Esto es debido a que los trabajos sobre los sismos volcánicos sólo han tomado mucha importancia finalizando el milenio gracias al desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICS). El desarrollo de estas herramientas ha proporcionado aproximaciones a esos sismos; también facilita procesarlos de una forma mucho más óptima, proporcionando una mejor interpretación del fenómeno físico que para el caso del presente texto se trata de una aproximación a la forma de la onda del sismo tornillo como una onda generada en un resonador.

Dentro de este contexto el modelo del resonador de Helmholtz permite describir ondas que se generan en los gases; además, por ser un instrumento que por su geometría hace posible desarrollar una analogía con un sistema masa resorte (que posibilita reproducirse por medio de una simulación), facilita poder enseñar este fenómeno y poder acercarse a sus variables de estado de una manera simple

Para concluir, el estudio de las ondas a través de fenómenos reales, en este caso a partir de los sismos volcánicos, se hace importante puesto que permite abordar algunas temáticas

en un curso de ecuaciones diferenciales, mostrando otro tipo de aplicaciones de estas. En adición posibilita acercarse al comportamiento de los fluidos en condiciones reales que se encuentran en un volcán. Así pues, esto propicia entender que esta estructura geológica es un gran resonador (Konstantinou , 2015), debido a que una forma de describir la elasticidad de los fluidos al interior del volcán es a través del modelo de Helmholtz

Objetivos

-General

Comparar las ondas sísmicas volcánicas de largo periodo de tipo tornillo con una onda generada con el modelo del resonador de Helmholtz y contrastarlas a través de una simulación en Matlab en el estudio de la física de ondas

-Específicos

-Comprender el funcionamiento de un resonador de Helmholtz

-Categorizar los diferentes tipos de ondas sísmicas volcánicas en particular las de tipo tornillo.

-Desarrollar una simulación en Matlab que muestre el comportamiento de un resonador de Helmholtz e implementar esta aplicación en el curso de Ecuaciones diferenciales de la Universidad Pedagógica Nacional.

-Analizar los resultados los alcances al implementar un simulador en el estudio de las ondas acústicas amortiguadas.

Antecedentes

Desarrollando una exhaustiva investigación acerca de la relación de los sismos tornillo, su descripción matemática y la relación existente con el resonador de Helmholtz, además de una forma de implementar la simulación en el aula a través de las ecuaciones diferenciales se llegaron a los siguientes antecedentes.

El primer trabajo es un artículo escrito por Konstantinou K I (2015), en este el autor examina con detenimiento los sismos tornillo generados en el VG, así mismo estudia las mezclas de gases que se generan al interior del volcán, los simula explicando que variaciones hace a los parámetros del resonador con respecto a las propiedades de los gases.

En segundo lugar se encuentra el trabajo de (Mayorga & Poveda, 2013). Este presenta como se hace a partir de un análisis gráfico y numérico de una onda sismológica, mostrar conceptos de esta y hacer un tratamiento de matemático a partir de herramientas como la transformada rápida de Fourier.

El tercer trabajo se encuentra (Fazio, 2017) el cual hace una serie de simulaciones de fluidos en poros, en especial los que se encuentran al interior de un complejo volcánico y que son superficiales, llegando a la conclusión que los sismos tornillo se pueden generar a muy baja profundidad y que estos fluidos son los que generan una serie de señales sísmicas, caracterizadas por la baja frecuencia y la coda larga

Finalmente se encuentra el trabajo de (Molina Mora, 2015) donde el autor busca a partir de las modelaciones computarizadas de las ecuaciones diferenciales, relacionar con las posibles respuestas e interpretaciones que los estudiantes den a un fenómeno físico, como los posibles cambios que pueda tener el fenómeno y su disquisición.

Capítulo I— Los volcanes: un acercamiento a la geodinámica interna del planeta

El primer capítulo desarrolla el concepto de volcán, sus partes y su clasificación según su modo de erupción, enfocándose en los volcanes de tipo explosivo. En cuanto a los modos de vigilancia de estos se hace énfasis en la sismología a partir de los instrumentos de detección como son los sismómetros, los cuales reportan una serie de señales sísmicas. Estas son las Vulcano Tectónicas, el Tremor Volcánico, las señales de largo periodo entre las cuales está Tornillo, sus características y la analogía de su firma sísmica con respecto a la señal del resonador de Helmholtz.

1.1 Volcán

Un volcán se define como una ventila o chimenea que transfiere roca fundida conocida como magma desde la profundidad a la superficie de la Tierra (Australian, 2016). Esto quiere decir que para que exista un volcán debe haber dos condiciones: una fuente de calor y un material para fundir, como es el caso del Mauna Loa en Hawái, o el Stromboli en Italia. A partir de este contexto es posible describir que la fuente de calor está concentrada en la cámara magmática en donde se almacena el magma, el cual es una mezcla de roca fundida con gases y cristales, según González (2017). El magma al salir de la cámara magmática se denomina lava (Tarbuk & Lutgens, 2005). Las lavas se encuentran a altas temperaturas, por lo cual hace que el material que sube a la superficie sea menos denso, por tanto hay una interacción entre el líquido y el vapor, haciendo que los gases que posee el magma se depositen en los conductos de la estructura volcánica; los conductos que comunican la cámara y el cráter se denominan chimeneas. El cráter o respiradero es la conexión entre la chimenea con la superficie. Este se encuentra en la cima o en una pendiente del cono volcánico¹, donde son expulsados los materiales del volcán como gases, ceniza y lavas (Zobin, 2003); así se puede apreciar en la figura 1.2 La expulsión se presenta debido a la composición química de estos materiales, y por ende hay diversos tipos de erupciones que permiten clasificar los volcanes.

¹ El cono volcánico es el resultado de la acumulación del material de las erupciones (Zobin, 2003)

A continuación, teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, los volcanes se catalogan a partir de la cantidad de dióxido de silicio y la temperatura de sus magmas². Esto hace que sean más viscosas y las erupciones sean más explosivas (Keller & Blodgett, 2004). En este orden de ideas se encuentran los Hawaianos, que se localizan en la Isla de Hawái. Su principal característica consiste en que sus lavas son menos viscosas (Hazlet & Lockwood, 2010). Después de estos siguen los Estrombolianos, los cuales tienen como principal rasgo que el magma es poco viscoso, pero la composición química de este posee una mayor cantidad de elementos volátiles y son separados por periodos de calma, por tanto no hay lluvia de cenizas. Un ejemplo de ellos es el Stromboli en Italia (Tarbuk & Lutgens, 2005). Seguidamente en la clasificación, están los Vulcanianos en donde se encuentra el VG. Estos tienen como característica que el magma es más viscoso comparado con el anterior caso y las emisiones de gases volátiles generadas en ellos son más elevados (Kusky, 2008). Luego se encuentran los Plinianos que por lo general poseen magmas muy viscosos y sus erupciones contienen una mayor concentración de ceniza; un ejemplo de este tipo de volcán es el Vesubio Italia (Zellmer & Annen, 2008). Finalmente se encuentran las Peleanas las cuales expulsan lavas demasiado viscosas. Esta lava se solidifica e impide la salida de los gases, lo que obliga a abrir grietas dentro del cono volcánico.

Cabe destacar que según su grado de explosividad los volcanes son monitoreados a partir de técnicas geoquímicas. Es preciso citar los espectrómetros de gases que se encargan de medir la cantidad de estos, en especial del dióxido de Azufre, del gas carbónico y del vapor de agua, los cuales son los gases que más se encuentran en los volcanes; el primer gas mencionado es de gran relevancia, ya que este da razón de posible erupción (Macias Vazquez & Capra, 2005). Además de las técnicas geoquímicas que monitorean los volcanes según su grado de explosividad, también existen técnicas geofísicas tales como la gravimetría, la magneto-telúrica y la sismología. Esta última es la más usada y es una de las formas más comunes de la observación de volcanes por la economía que representa, puesto que sus sensores de monitoreo (sismómetros) son fáciles de instalar y se han usado para recoger datos cerca al volcán desde hace un siglo (Mader, Coles, Conor & Conor, 2006).

² Para más información sobre los tipos de magmas pueden consultar (Tarbuk & Lutgens, 2005)

Así mismo, se encuentran unas ventajas adicionales, pues los sismómetros actuales son digitales, tri-axiales³ y reportan señales en tiempo real que dan cuenta de los movimientos que se generan al interior del volcán. En el siguiente apartado son explicados los diversos sismos volcánicos, su clasificación y en qué consisten.

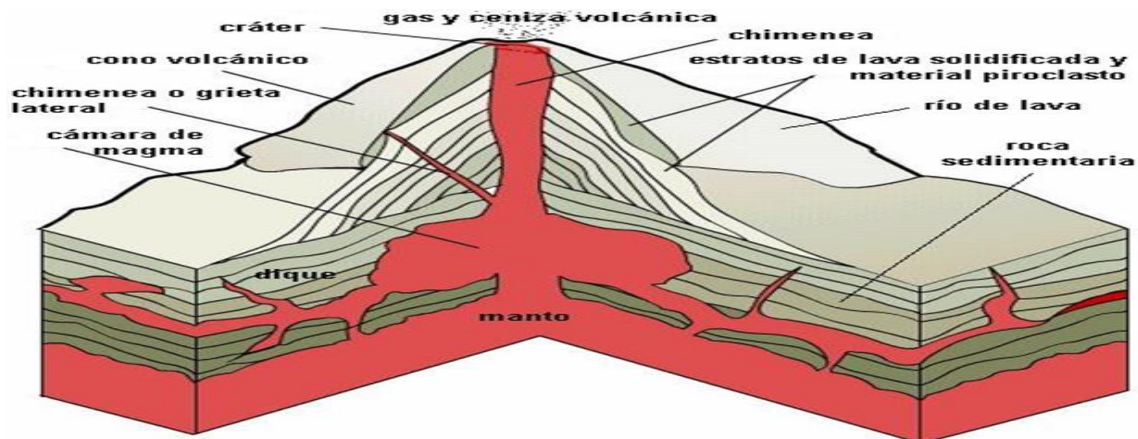


Figura 1,1. Estructura interna de un volcán Fuente <http://www.proteccioncivil.org/>

1.2. Sísmica Volcánica

Las perturbaciones volcánicas son aquellas que describen procesos internos alrededor del volcán, como son dinámica, transporte de fluidos, y esfuerzos al interior del edificio volcánico (Ibañez & Carmona, 1997). Esto hace que las señales registradas en este tipo de ambientes sean diversas. A partir de las investigaciones de estos sismos la primera clasificación que se hace es la de Minakami (Zobin, 2003), teniendo en cuenta la sísmica del volcán Sakurayama en Japón. Minakami (1968) las clasifica en las de tipo A, B, y C. Luego Ibañez en 1997 hace otra clasificación unificando tanto el comportamiento de las señales de los volcanes japoneses y los volcanes andinos.

Dentro de esta clasificación se hallan las siguientes señales:

-Tremor Volcánico (Tipo Explosivo)

³ Los sismómetros tri-axiales son aquellos cuyas señales están categorizadas por los tres ejes como son norte-Sur, este-oeste, Vertical.

-Vulcano-Tectónicos (Tipo A)

-Largo Periodo (Tipo B)

1.2.1 Tremor Volcánico. Es una señal sísmica que puede durar horas e incluso días, por lo tanto, no presenta un inicio y final preciso en la forma de la onda (ver figura 1,2 a). Pero quizá las características más interesantes estén en su contenido espectral, donde se pueden registrar comportamientos diversos (Araujo, 2012); por lo general, este tipo de señales describen procesos de dinámica de fluidos y se plantean diversos tipos de modelos como las cavidades llenas de gases. Este tipo de modelos explica el comportamiento de los gases al interior de un volcán, pero su complejidad de señal tiene una mayor cantidad de picos en sus espectros de frecuencia (Figuras 1,2b-1,2c) que son bastante complejos de estudiar y describir a través de geometrías sencillas.

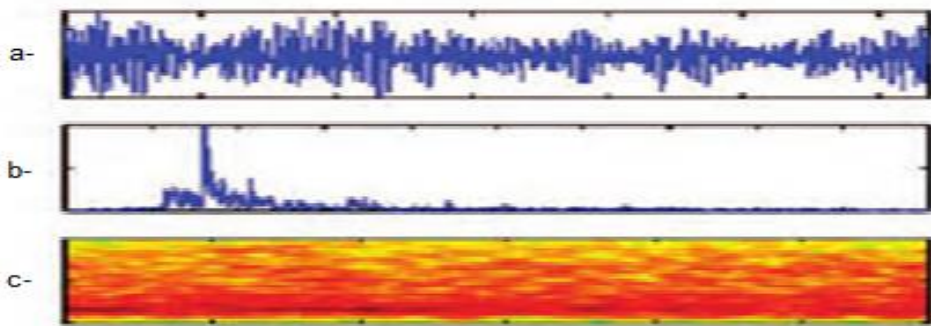


Figura 1,2 Tremor Volcánico. a- Sismograma de tremor en su dominio del tiempo, B-diagrama de frecuencias del sismo c- Concentración de máximos picos de frecuencia (Araujo, 2012)

Ahora, los espectros de frecuencia son representaciones gráficas de estas señales que se hallan en un conjunto de ondas superpuestas que están en el dominio del tiempo; para hallar su frecuencia se recurre a la transformada de Fourier (ver anexo 1). La información contenida en los diagramas de frecuencia (figura 12 b) muestra el comportamiento de la energía de la onda, es decir a mayor pico, mayor energía.

1.2.2 Sismos Vulcano-Tectónicos. Los Sismos Vulcano-Tectónicos (VT) son aquellos que describen un comportamiento del fractura miento de las rocas en el complejo volcánico, debido a la interacción de esfuerzos con el Magma. Por lo general, estos sismos están compuestos por ondas de tipo P⁴ y de tipo S, como se observa en las figuras 1,3 a, b, c. Estos movimientos, por lo habitual, tienen unas frecuencias dominantes que se encuentran desde los 5 a 30 HZ (Ibañez & Carmona, 1997). Ahora bien, (Observatorios Sismológicos y Vulcanológicos, 2016) el origen de los VT es asociado a fracturas que ocurren como respuesta a cambios de esfuerzos en las áreas activas por movimiento de fluidos, y como consecuencia de este tipo de movimiento hay ruptura de roca al interior del complejo volcánico, en especial, en la zona dúctil-frágil, en ciertos casos donde la presión generada en la zona hidrostática hace que se oponga a la dilatación de esta.

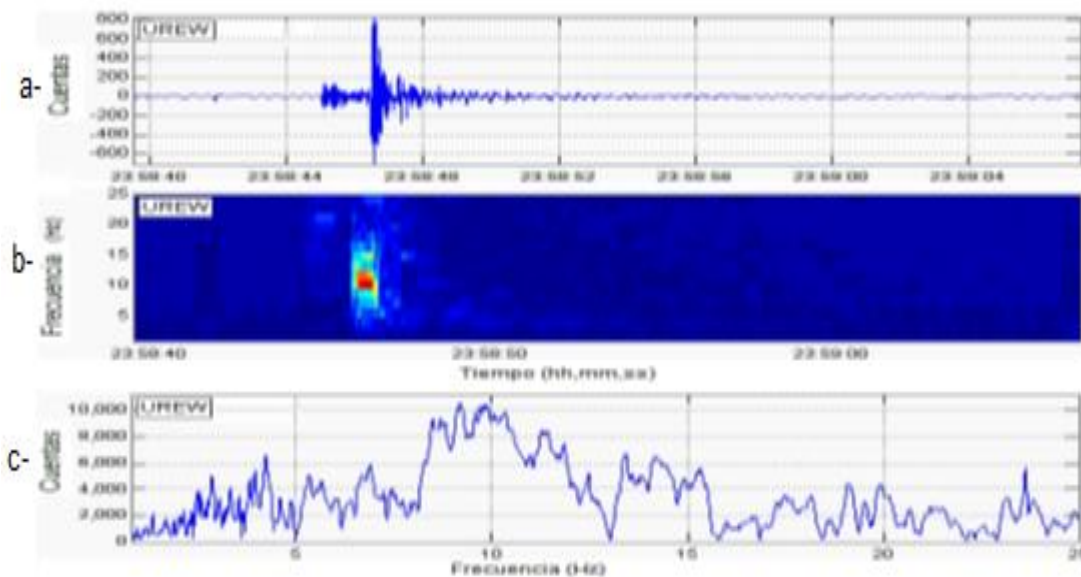


Figura 1,3 Señal asociada a un sismo VT originada en el VG, registrado en la estación UREW. (a) Forma de onda del sismo en el dominio del tiempo, (b) Espectro de energía de la señal donde se observa que no hay un ancho de banda estrecho y está distribuida aleatoriamente (c) Espectro de frecuencia de la señal Tomado del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto - Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS)

⁴Para más información sobre las ondas P puede consultar el trabajo de (Duitama Leal, 2013), como el de (Rosero Rueda, 2016)

1.2.3 Sismos de Largo Periodo (LP). Son producidos por la influencia directa de los fluidos dentro del conducto volcánico, los mismos que ocasionan efectos de resonancia o inestabilidad del magma. Estas señales se caracterizan por presentar al inicio altas frecuencias para luego ser dominadas por una señal de período largo o bajas frecuencias (Perez, 2014).

Bernard Chouet (1985) estudia este tipo de ondas al darse cuenta de que son muy similares a las señales que se generan en los tubos sonoros y que durante las erupciones volcánicas aparecen como sismos predecesores a erupciones. Usualmente predominan más las ondas de tipo P y la morfología de la firma sísmica es muy similar a la de un huso de tejer (ver figura 1,4 a). Los sismos LP, por lo general, se encuentran en las zonas hidrostáticas del volcán donde están confinados los acuíferos (Fazio, 2017).

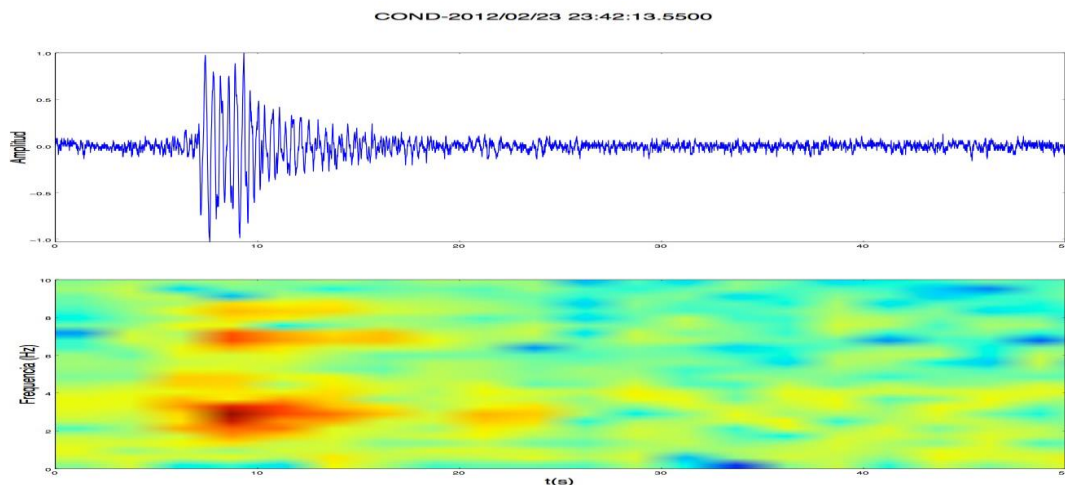


Figura 1, 4 Sismograma de un evento de largo periodo (LP) registrado en el volcán Purace en el dominio del tiempo. Abajo los espectros de frecuencia; estos no están concentrados en un ancho de frecuencia (Perez, 2014).

1.2.3.1 Sismo Tornillo. Son un caso particular de eventos LP que son registrados en volcanes de magmas andesíticos como el VG. Estos eventos han sido precursores de erupciones y emisiones de gas en este tipo de volcán (Torres, Gómez, *et al.*, 2002). Su forma de onda se caracteriza por ser sinusoidal, con un decaimiento exponencial lento, con duraciones del orden de los minutos. El contenido espectral de la señal tipo Tornillo está contenida alrededor de anchos de banda muy estrechos, y frecuentemente se presentan picos característicos (Lizaraso Calderon, 2013). Como se puede apreciar en la figura 1.5 b,

el pico de frecuencia se encuentra muy bien ubicado, donde se concentra la mayor frecuencia de la onda. Ahora, las principales características del sismo tornillo son:

1-La forma de onda es cuasi-sinusoidal, con un decaimiento exponencial relativamente lento de las amplitudes⁵ (ver figura 1,5 a) de la señal. Se presenta en los registros con largas duraciones en comparación con las amplitudes.

2-El contenido espectral de esta señal es monocromático, sobresaliendo uno o a lo sumo unos pocos picos espectrales agudos (Torres, Gomez, Ortega E, & Seidi, 2002). Esto da a entender que hay una interacción entre los fluidos del volcán y sus fases (Fazio, 2017). Adicionalmente, el espectrograma (ver figura 1,5 c) muestra básicamente que el contenido de energía se concentra en una banda de frecuencias estrecha y constante en el tiempo a lo largo de la señal.

3- Onda de tipo P (Perez, 2014); significa que hace vibrar una partícula en la dirección de propagación de las ondas, su movimiento es similar al de las ondas sonoras comprimiendo y dilatando el medio en que viajan (Sauter, 1989), por tanto pueden propagarse al interior de un fluido (Gonzalez S. , 2008).

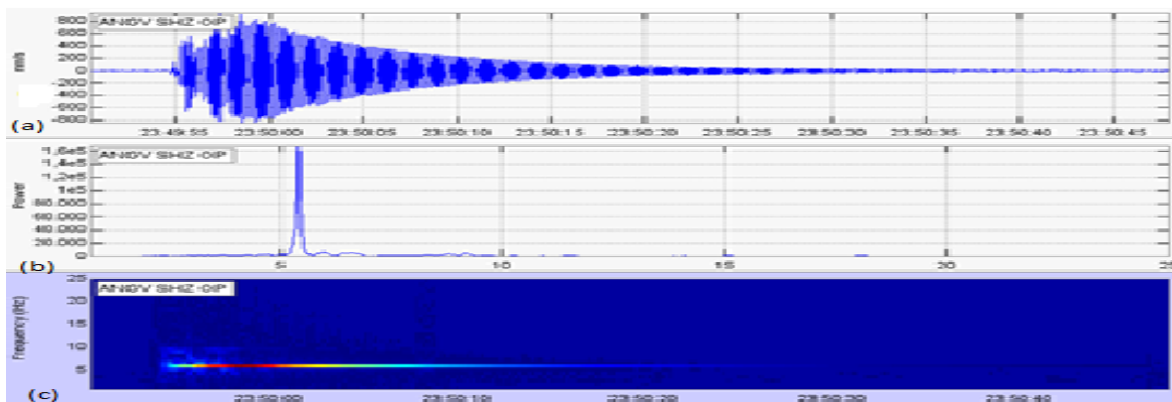


Figura 1,5 (a) Dominio del tiempo de la señal del Sismo Tornillo, (b) Dominio de la frecuencia de la anterior onda (c) espectro de energía de la señal, nótese que esta se encuentra en un rango muy angosto Cortesía del Servicio Geológico Colombiano

Después de las consideraciones anteriores, se trae a colación un modelo que explica el comportamiento de la señal. Tal modelo es el resonador de Helmholtz. Este está integrado y funciona por un tubo que contiene una lámina de gas que se mueve dentro de este por

⁵ El origen físico del decaimiento de la señal es debido a la viscosidad del gas y a la pérdida de radiación (Tary, Van der Ban, Sutherland, & Eaton, 2014)

medio de un pulso de presión y una cavidad h llena del mismo fluido de la lámina, luego, comienza a desplazarse al interior del tubo como si fuera una masa con un resorte, como se puede ver en la figura 1,6a. Resulta pertinente decir que este modelo representa un movimiento de fluido al interior del volcán conocido como la burbuja de gas. El cual funciona de la siguiente forma: al inicio del conducto se forma una burbuja que es impulsada por un pulso de presión; al asumir que esta se desliza por el tubo, el cual está aislado térmicamente, trae como consecuencia que la burbuja, al deslizarse, comienza a perder temperatura, presión, velocidad y aumenta su densidad hasta que implosionan como se puede apreciar en la figura 1,6 b. Este fenómeno se conoce como cavitación. Por último el modelo de Helmholtz describe el comportamiento termodinámico de la burbuja cuando esta recorre el conducto, y este se utiliza para analizar las mezclas de gas carbónico-Vapor de Agua.

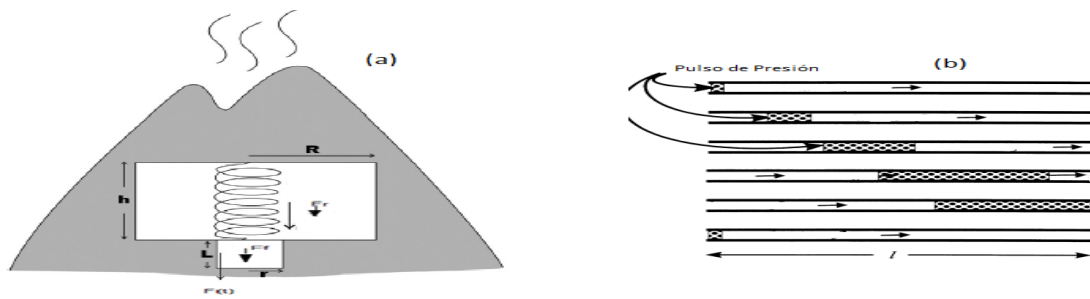


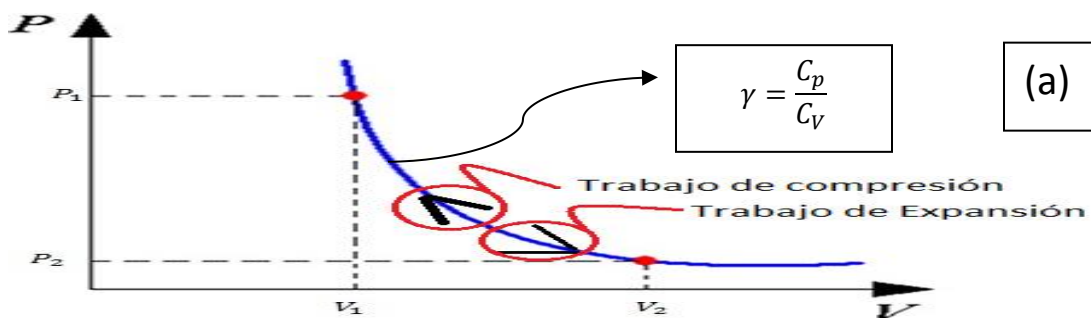
Figura 1,6 (a) ilustración que muestra la geometría del resonador de cavidad, donde el volumen del resonador es cilíndrico de altura h y radio R , el tubo por donde se desplaza la masa de radio r y longitud L el cual está sometido a diversas fuerzas como son $F(t)$: $f_{forzado}$: f_r : $f_{resorte}$: f_f : $f_{friccion}$ (Konstantinou, 2015) (b) Diagrama del comportamiento de la burbuja recorriendo un tubo de longitud l , de arriba abajo representa como la burbuja en el tiempo se mueve y va alargando más, este proceso por lo general cíclico (Hellweg, 1999)

Capítulo 2 – Las Ondas Sonoras y su Relación con el Resonador

Este capítulo expone los procesos adiabáticos, los cuales permiten explicar el comportamiento de los gases ideales. Después de esto se trata el módulo de elasticidad para hablar de las ondas sonoras, las variables que interactúan con su comportamiento y cómo estas se pueden describir a través del resonador Helmholtz. Para finalizar, se aborda el funcionamiento de este, su composición y características, así como el modelo físico que muestra las formas de onda que se generan en resonador

2.1 Procesos Adiabáticos del Gas

Un proceso adiabático es aquel donde el sistema no pierde, ni gana calor con el entorno (Cengel & Boles A, 2012). Para explicar el concepto anteriormente expuesto se debe asumir que se tiene un gas, el cual se calienta previamente y se encierra en un contenedor que tiene un pistón que se puede deslizar sobre las paredes en donde está aislado térmicamente sin una fuente de calor externa; luego se le aplica una presión P_1 tal que comprime el gas hasta un volumen V_1 , como se puede ver en la figura 2.1 b. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, el gas se expande y se comprime hasta llegar a una presión P_2 y un volumen V_2 . Este proceso evoluciona sin necesidad de flujo de ingreso o de salida de calor como se aprecia en la figura 2,1 a.



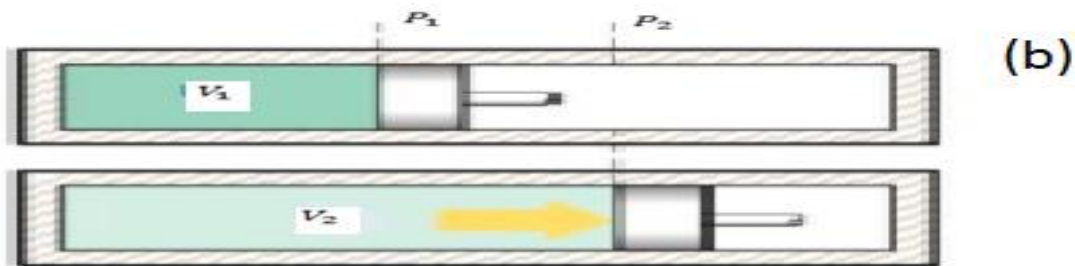


Figura 2,1 (a) Esquema de un proceso de tipo adiabático en un gas, el cual se le da una presión inicial mayor P_1 con un volumen inicial menor V_1 , luego pasa a un volumen final mayor V_2 y presión menor P_2 se conoce como trabajo de expansión del gas, mientras que cuando este va en dirección opuesta se conoce como trabajo de compresión (b) Comportamiento de un gas que está confinado al interior de un envase que está aislado térmicamente y tiene un pistón que se desliza sobre las paredes del conducto (Mosquera, 2017).

Vale destacar que para describir el fenómeno anteriormente expuesto se recurre al coeficiente adiabático de los gases γ . Este se define como la relación entre el calor específico a presión constante C_p y el calor específico a volumen constante C_v como se puede apreciar en la figura 2.1 a

En este orden de ideas, para explicar el comportamiento adiabático de los gases se acude a la primera ley de la termodinámica la cual *es una generalización de la ley de la conservación de la energía que incluye los posibles cambios en la energía interna* (Van Wylen, Sonntag, & Borgnakke, 2008), Expresando las variaciones de calor y energía interna del gas se obtiene:

$$dU + dW - dQ = 0 \quad (2.1)$$

Donde dU es la variación de la energía interna y $dW - dQ$ son variaciones de trabajo y calor que realiza el sistema; como no hay variación de calor $dQ = 0$ y hay trabajo de compresión en el gas, por tanto $dW = -Pdv$ reemplazando en la ecuación (2.1) se obtiene

$$dU - Pdv = 0 \quad (2.2)$$

⁶ Para las mezclas entre gases este se define como $\gamma_{mezcla} = \gamma_{gas}\phi + \gamma_{vapor}(1 - \phi)$ donde ϕ es la fracción molar del gas.

⁷ El calor específico a presión constante es la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una masa unitaria de una sustancia a presión constante (Cengel & Boles A, 2012)

⁸ El calor específico a volumen constante es la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una masa unitaria de una sustancia a volumen constante

Considerando que el gas es ideal, este se comporta como lo plantea su respectiva ecuación

$$PV = nR_u T \quad (2.3)$$

Donde R_u es la constante universal de los gases⁹, Ahora diferenciando la ecuación (2.3) y reemplazando en (2.2) y desarrollándola en el anexo 3, se obtiene la expresión de trabajo en un proceso adiabático la cual es:

$$W = \frac{PV_1^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}) \quad (2.4)$$

Si se analiza la expresión (2.4) y observando si existe una expansión adiabática del gas ($V_2 > V_1$) o sea *el gas* realiza trabajo a costa de su energía interna la cual disminuye, lo que da a entender es que hay un enfriamiento del gas y por ende una expansión de este, en caso opuesto el gas se comprime como se aprecia en la figura 2.1 a, Este fenómeno muestra el comportamiento elástico de los gases, por tanto el parámetro que los caracteriza que se denomina el módulo de elasticidad, el cual se va a explicar a continuación.

2.2 Modulo de Bulk

El módulo de elasticidad o Bulk como se denomina en inglés, el cual se representa con la letra B (The Boeing Company, 1968)¹⁰, *Este se refiere a la contracción o tasa de deformación de un material isótropo e isotérmico sometido a una compresión isostática* (Dutrion, 2014) y se expresa por la siguiente relación:

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V} V \quad (2.5)$$

Para los gases¹⁰ el módulo de elasticidad se define como el producto entre el coeficiente adiabático de los gases por la presión de estos (Chouet & Kumagai, 2000), Cabe destacar que las variaciones de B para los anteriormente nombrados son considerables

⁹ La constante universal de los gases en el sistema MKS es $8.31472 \frac{J}{molK}$ (Van Wylen, Sonntag, & Borgnakke, 2008)

¹⁰ Para las mezclas bifásicas de gases, estos se definen como $B_{mezcla} = \gamma_{mezcla} P$ (Chouet & Kumagai, 2000)

cuando varia el volumen mientras que en los líquidos¹¹ Varía la presión, por eso los líquidos se denominan incompresibles y los gases compresibles (Armijo, 2005). Ahora la compresibilidad hace que la densidad del gas sea variable con respecto a la temperatura y la presión, Eso hace que describir ondas de gas sea complejo, ya que para que estas se desplacen a través de medios continuos los cuales no admiten discontinuidades a nivel microscópico, se deben tener ciertas consideraciones que a continuación se va a explicar junto con el concepto de ondas sonoras y qué condiciones se requieren para poder ser descritas.

2.3 Las ondas sonoras y su relación con la velocidad del sonido.

Las ondas sonoras se pueden definir como perturbaciones de presión muy pequeñas que viajan de forma longitudinal en un medio elástico como son los gases (Cengel & Cimbala, 2008), su comportamiento se debe a una serie de enrarecimientos y compresiones que suceden en el medio que se propagan a causa de cambios en la presión y la temperatura, esto hace que la densidad de este se altere, generando que las perturbaciones se puedan irradiar, ahora *la propagación de un pulso infinitesimal de presión en un fluido en reposo se conoce como la velocidad del sonido* (White F. M., 1983) . Teniendo en cuenta la anterior definición, para exponer este fenómeno se considera un fluido que se halla estacionario, este se encuentra dentro de un volumen de control¹² (figura 2.2), el cual se perturba a través de un pulso de presión unidimensional que viaja a una velocidad C que atraviesa el volumen alterando la presión, temperatura, densidad¹³ y velocidad del fluido como se aprecia en la figura 2,2

¹¹ ¹¹ Para las mezclas gas liquido $B = \left(\frac{\varphi}{\gamma p} + \frac{1-\varphi}{B_{agua}} \right)^{-1}$ donde $B_{agua} = 2.2 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$ (White, 1983)

¹² Un Volumen de control se define como una región la cual se encuentra aislada con una frontera real o imaginaria que las separa de los alrededores (Van Wylene, Sonntag, & Borgnakke, 2008)

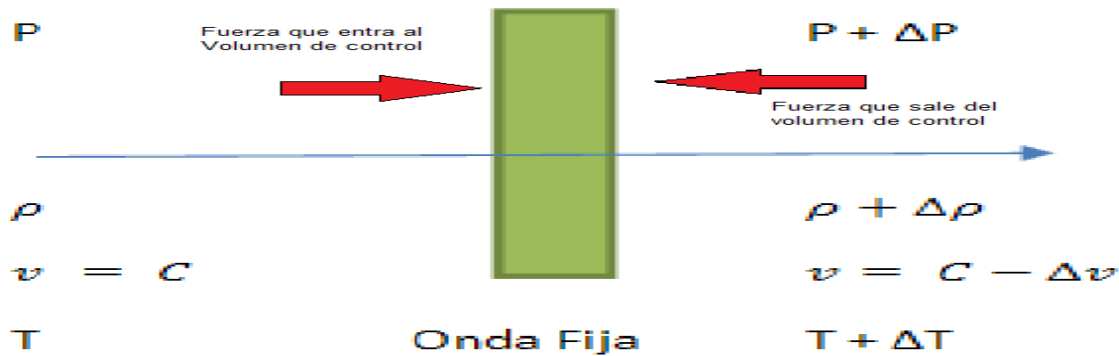


Figura 2,2. Propagación de una onda de presión a lo largo de un volumen de control donde P: Presión, ρ : densidad¹⁴, T: temperatura V: velocidad del sonido. Fuente el autor

Siguiendo con el análisis del fenómeno anterior, se recurre a la ecuación de continuidad la cual afirma que la cantidad de masa que entra por un volumen de control fijo es la misma que el que sale de este (White, 1983), esto con el fin de verificar si hay conservación del momentum, ahora reemplazando en (2.3) calculando la velocidad inducida al fluido¹⁵ se tiene:

$$\sum_i (\rho_i A_i V_i)_{entrada} = \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{salida} \quad (2.6)$$

$$\rho A C = (\rho + \Delta\rho) A (C - \Delta v) \quad (2.7)$$

$$\Delta v = C \frac{\Delta\rho}{(\rho + \Delta\rho)} \quad (2.8)$$

Así mismo se observa que la velocidad que se le induce al fluido es muy pequeña comparada con la velocidad del sonido, así mismo, la relación entre estas velocidades se conoce como el Numero de Mach (Ma) cuya característica es adimensional, que permite hacer una consideración de los flujos compresibles a incompresibles siempre que este número sea menor a 0.3 (Armijo, 2005)

En cuanto a la expresión matemática que describe el comportamiento de la velocidad del sonido, esta se define desde la acústica como la raíz cuadrada entre el módulo de

¹⁴ para las mezclas gas- líquido la densidad del gas se define como $\rho_{gasliquido} = \rho_{gas}\varphi + (1 - \varphi)\rho_{agua}$
Con $\rho_{agua} = 1000 \frac{Kg}{m^3}$.

¹⁵ También conocida como velocidad inicial del fluido (White F. M., 1983)

elasticidad y la densidad del medio (Dutrion, 2014) , este modelo es muy utilizado para describir medios incompresibles¹⁶ , Así mismo, este término se conoce como la ecuación de Newton Laplace el cual se define de la siguiente forma:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.9)$$

Teniendo en cuenta la definición del módulo de elasticidad para los gases, se recurre a la ecuación (2.3) para gases ideales donde n se enuncia como la correspondencia entre la masa del gas y su masa Molar, luego, se detalla la constante del gas R_{gas} como la relación entre la constante universal de los gases por la masa Molar del gas, al igual que se relaciona la masa del gas por su volumen conocida como la densidad¹⁷ , Desarrollando la expresión se obtiene:

$$PV = \frac{m_{gas}}{M_{molar\ gas}} R_u T \quad (2.10)$$

$$\rho_{gas} = \frac{m_{gas}}{V} \quad (2.11)$$

$$R_{gas} = \frac{R_u}{M_{molar\ gas}} \quad (2.12)$$

Haciendo las respectivas sustituciones y reemplazando (2.12), (2.11) en (2.10) se obtiene la expresión que define la densidad que es:

$$\rho_{gas} = \frac{P}{R_{gas} T} \quad (2.13)$$

¹⁶ Para las mezclas gas liquido $C_{gasliquido} = \sqrt{\frac{E_{gasliquido}}{\rho_{gasliquido}}}$ (Torres, Gomez, Ortega E, & Seidi, 2002)

¹⁷ Para las mezclas bifásicas como $\rho_{gasmmezcla} = \frac{P}{R_{Mezcla} T}$ Donde $R_{Mezcla} = R_{gas}\phi + (1 - \phi)R_{vapor}$ (Chouet & Kumagai, 2000)² . Por ultimo para las mezclas gas- líquido la densidad del gas se define como $\rho_{gasliquido} = \rho_{gas}\phi + (1 - \phi)\rho_{agua}$
 Con $\rho_{agua} = 1000 \frac{Kg}{m^3}$.

Luego, a partir la ecuación de Newton Laplace y haciendo las debidas sustituciones se obtiene la ecuación de la velocidad del sonido para describir los gases¹⁸ la cual se muestra a continuación:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\gamma R_{gas} T} \quad (2.14)$$

En definitiva, una forma para describir el comportamiento de las ondas sonoras es a partir del resonador de Helmholtz, el cual es un dispositivo muy simple que se va a desarrollar a continuación

2.4 Resonador de Helmholtz

. Es un dispositivo compuesto por un cuello resonador, el cual es un tubo abierto, una cámara, cavidad o volumen del resonador, cuya forma es un tubo cerrado con un diámetro superior al del cuello, y un orificio en el extremo superior, como se puede observar en la figura 2.5 d. Un ejemplo del funcionamiento del resonador es cuando una botella almacena en su interior un gas, que suele ser aire. Este gas genera un sonido cuando se sopla transversalmente sobre el cuello. Esto se produce cuando el aire se introduce en la cavidad y, por tanto, la presión interior de esta crece. En seguida, cuando el agente externo que fuerza al aire hacia el interior de la cavidad desaparece, el gas comprimido del interior fluye hacia el exterior. Este flujo de aire tiende a sobre-compensar la discrepancia de presión

Por una parte, debido a la inercia del aire en el cuello una pequeña porción de este sale, de modo que la presión de la cavidad disminuye, alcanzando un valor ligeramente menor y esto hace que el Gas de nuevo fluya hacia el interior. Este proceso tiende a repetirse de manera continua, sin embargo, los cambios de presión van decreciendo (Maricer, 2009).

En definitiva se puede afirmar que el resonador es un tubo cuya configuración es abierto en la parte superior y cerrado en el extremo inferior, así mismo dentro del cuello al no cambiar abruptamente su forma hace que cuando el gas se desplaza internamente en el

¹⁸ Para las Mezclas Bifásicas de gases la velocidad del sonido se define como:

$$C_{Mezcla\ gases} = \sqrt{T R_{Mezcla} \gamma_{Mezcla}}$$

dispositivo genere nodos¹⁹ y antinodos²⁰ de presión. Por otra parte, sabiendo que una onda sonora se comporta de forma análoga a una cuerda puesto que esta se desplaza por un medio elástico como es el gas mientras que en la cuerda lo hace a través de su masa, los nodos de presión se hallan en los extremos del tubo para el primer armónico y en el punto medio del mismo se genera el antinodo de presión, para el segundo armónico los nodos se comportan de forma análoga al primer caso y se producen dos antinodos de presión y así sucesivamente como se puede apreciar en la figura 2,3 , por tanto la expresión matemática que describe el fenómeno es:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (2.15)$$

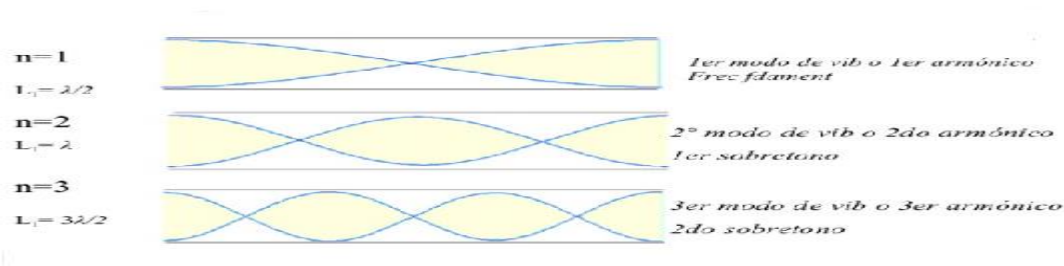


Figura 2,3. Esquema de un tubo abierto, en estos dispositivos se evidencia que sus extremos no están cerrados (Laboratorio de procesamiento de imagen, 2016)

Donde L es la longitud del tubo, n la cantidad de nodos de vibración, con $n \in \mathbb{Z}^+$ y su Longitud de Onda $\lambda_n = \frac{c}{f}$. Reemplazando en la ecuación (2.15) la longitud de onda y calculando la longitud del tubo se obtiene:

$$L = \frac{nc}{2f} \quad (2.16)$$

El comportamiento de estas depende del diámetro y la longitud de los dispositivos estudiados, por tanto para corregir este tipo de errores se recurre a la fórmula de corrección de bordes la cual es una ecuación empírica que se conoce como **la longitud efectiva del tubo**, esta permite tener en cuenta los efectos de la inercia dentro del cuello considerando que la masa del gas se encuentra en una longitud mayor a la del tubo. Por último se define esa relación de la siguiente forma.

¹⁹ Los nodos de presión se definen como los puntos donde la amplitud de vibración del gas es máxima

²⁰ Los antinodos de presión se define como los puntos donde el gas no se desplaza

$$l' = L + 0.8(2r) \quad (2.17)$$

Retornando a la idea de la forma del resonador, al ingresar el flujo de aire por el cuello con una velocidad inicial, al pasar el flujo por la cavidad, este pierde velocidad por la diferencia de área a la que se encuentra y una parte del flujo sale de la cámara debido a la elasticidad del medio, luego se puede afirmar que la energía con que el caudal de flujo entra al cuello y sale de este es cinética y potencial elástica cuando entra al volumen, es decir se comporta de manera análoga a la energía total en un sistema masa resorte.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, para describir matemáticamente el comportamiento de la señal se procede a hacer una analogía con un sistema masa resorte, ahora se considera una masa de gas que se desplaza dentro del cuello de extremo a extremo como se ve en las figuras 2,4 d y 2,4 e, luego esta se asume como si fuera la masa que va adherida a un resorte y este último se toma como el volumen del resonador como se aprecia en el diagrama de fuerzas (ver figura 2,4 (c)), se puede afirmar que estas interactúan entre sí sin asumir la gravedad, donde se origina la sumatoria de fuerzas que se expresa de la siguiente forma:

$$\sum f_y = f_{resorte} + f_{friccion} + f_{forzado} = ma = m \frac{dv_y}{dt} = m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2.18)$$

Donde

$$f_{resorte} = -Ky \quad (2.19)$$

$$f_{friccion} = -bv = -b \frac{dy}{dt} \quad (2.20)$$

$$f_{forzado} = F(t) \quad (2.21)$$

Reemplazando (2.21); (2.20); (2.19) en (2.18), multiplicando esta última por $\frac{1}{m}$; asignando a $2\lambda = \frac{b}{m}$ y $\omega^2 = \frac{K}{m}$; Organizando la expresión (2.18) se obtiene la siguiente ED:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\lambda \frac{dy}{dt} + \omega^2 y = \frac{F(t)}{m} \quad (2.22)$$

Cabe destacar que ω en la expresión 2.22 es la velocidad angular del sistema masa resorte y 2λ es el coeficiente de fricción, en particular para el resonador de Helmholtz se

conoce como el **coeficiente acústico de absorción**²¹ el cual se define como las pérdidas de energía del dispositivo en forma de radiación acústica (Howe, 1976). En otros términos, matemáticamente es la relación entre la velocidad del sonido del gas, el cuadrado del área transversal del cuello (S^2)²², por el volumen del resonador (V_0), la constante de proporcionalidad (8π) y el cuadrado de la longitud efectiva del cuello. Cabe agregar que la proporción entre el área transversal del cuello y la longitud efectiva del tubo se conoce como el *coeficiente de conductividad de Rayleigh*²³ denotado por k_r , el cual se define como la impedancia acústica²⁴ en el efecto inercial del fluido (Laurents & Tordeux, 2012), En cuanto a la velocidad angular con respecto al resonador se establece lo siguiente, la constante de elasticidad se define como la proporción entre el módulo de elasticidad del gas por el cuadrado del área transversal del cuello y el volumen del resonador (Maricer, 2009), Por otro lado, con respecto a la masa en el modelo de Helmholtz esta se representa como el producto entre la densidad, el área transversal del tubo y la longitud efectiva de este, teniendo en cuenta la ecuación (2.17), reemplazando (2.23);(2.24);(2.21) en (2.22) se obtiene la siguiente ED:

$$f_{friccion} = 2\lambda \frac{dy}{dt} = \frac{CS^2}{8\pi V_0 l'^2} \frac{dy}{dt} = \frac{Ck_r^2}{8\pi V_0} \frac{dy}{dt} \quad (2.23)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{BS^2}{\rho S V_0 l'^2}} = \sqrt{\frac{BS}{\rho V_0 l'}} = C \sqrt{\frac{k_r}{V_0}} \quad (2.24)$$

$$\omega = 2\pi f \therefore f = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{V_0}} \quad (2.24a)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{Ck_r^2}{8\pi V_0} \frac{dy}{dt} + \frac{C^2 k_r}{V_0} y = \frac{F(t)}{\rho S l'} \quad (2.25)$$

Esta ecuación modela un movimiento armónico forzado el cual dependiendo a la variación de $F(t)$ cambia el movimiento de la oscilación, asumiendo que $F(t)$ es constante

²¹ Ver demostración del coeficiente acústico de radiación en (Howe, 1976)

²² El área transversal del cuello se define como $s = \pi r^2$ donde r es el radio del cuello del resonador

²³ $k_r = \frac{s}{l'}$

²⁴ La impedancia acústica es la resistencia que opone el medio a las ondas que se propagan sobre este (Sanabria, 2014)

dentro de la ecuación, esta describe un oscilador armónico amortiguado, en donde la amplitud decrece exponencialmente con el tiempo.

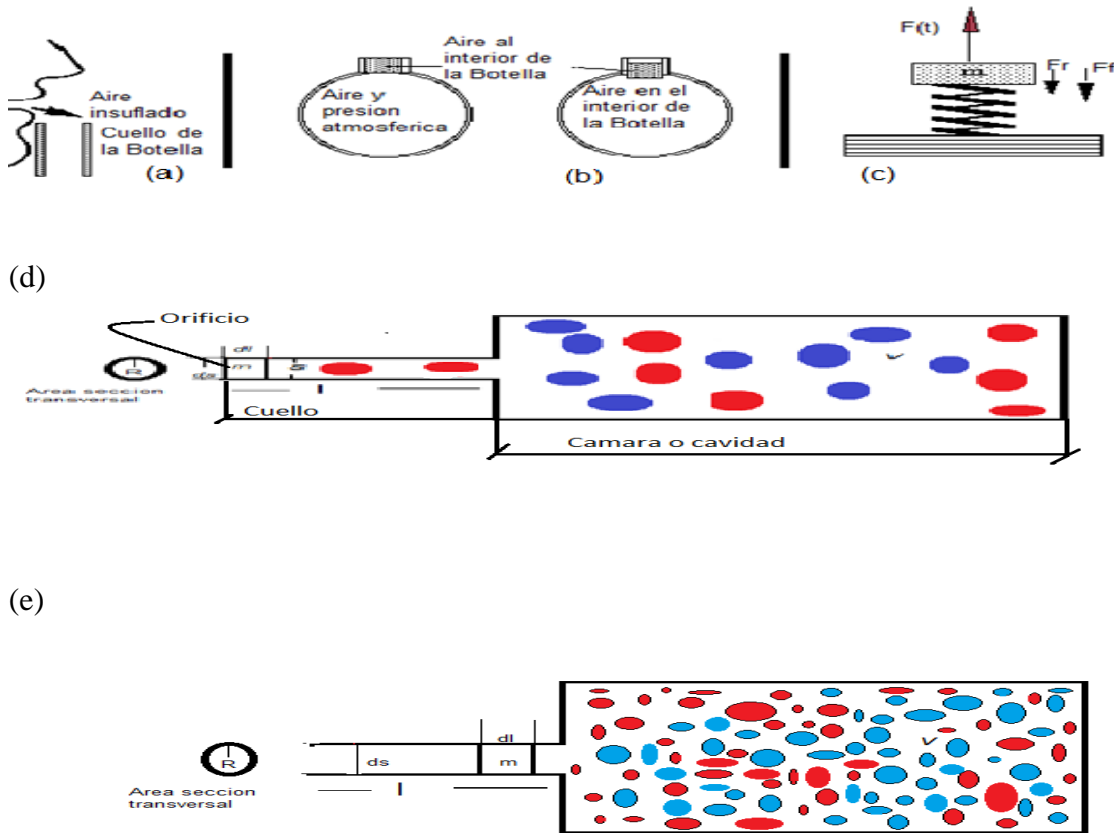


Figura 2,4 (a)Esquema de funcionamiento del resonador (Maricer, 2009) donde se muestra el funcionamiento de este cuando se le insufla aire al interior del cuello (b) diagrama de la cavidad del dispositivo antes que este se llene de aire y luego que este se llena, (c) diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que interactúan alrededor del cuello donde $F(t)$ es $f_{forzado}$: F_r : $f_{resorte}$: F_f : $f_{friccion}$ (d) Esquema del comportamiento de la masa de gas al interior del resonador antes que la masa de gas se desplace al interior del resonador (e) descripción del movimiento de la columna de gas sobre el cuello cuando llega al otro extremo donde se encuentra la cavidad del resonador, ahí se evidencia como las partículas de gas se comprimen

Por lo general el sistema responde a esta interacción mediante una disipación energética principalmente dentro del cuello y dependiendo de la geometría del resonador, esto hace que se generen sonidos característicos conocidos como los tonos, estos se generan cuando la masa que oscila dentro del cuello oscile con su máxima frecuencia, esto trae como consecuencia que se generen tonos bajos en resonadores con volúmenes de cavidad grandes y atenuaciones de la onda mucho más altas como se puede observar en la primera grafica de

la figura 2,5 o en caso opuesto tal como cuando se tienen un volumen pequeños y se encuentran atenuaciones muy cortas.

De la misma forma los diagramas de frecuencia que se generan en los resonadores muestran un pico característico de una señal monocromática, este se concentra en un ancho de banda por lo general estrecho, este fenómeno se evidencia a través del **factor de calidad** el cual se denomina con la letra Q , en donde se define como la razón entre la energía máxima generada en un ciclo y ésta disipada en este o la frecuencia de la señal por el ancho de banda de la misma (Δf) (Selescnick, 2011), Son una medida de la amortiguación de resonancia, por ejemplo, para una forma de onda de larga duración, el ancho de banda es estrecho, por tanto el pico de frecuencia es alto como se puede apreciar en la figura 2,5, por último el factor Q se define como el inverso multiplicado por dos del coeficiente de amortiguación de la onda (λ) (Bullen & Bold, 1985), los cuales se expresan por medio de la ecuación:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{1}{2\lambda} \quad (2.26)$$

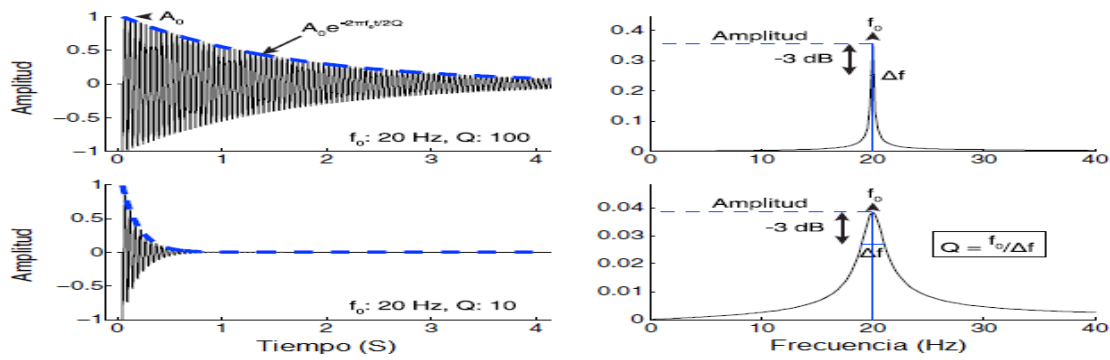


Figura 2,5 Representación gráfica de la definición de factor de calidad Q , Picos de frecuencia, ancho de frecuencia y amplitud, En el espectro de Fourier (graficas lado derecho) de dos formas de onda (izquierda), las líneas azules de estas últimas corresponden a la envolvente sinusoidal amortiguada (Tary, Van der Ban, Sutherland, & Eaton, 2014).

Capítulo 3 – Sobre la simulación y su relación con la enseñanza

En este Capítulo se habla sobre la definición e importancia de las simulaciones y los modelamientos en el estudio de los fenómenos físicos, de ahí se hace una descripción el modelo que permite compara la onda tornillo con la del resonador, el cual se utilizara para desarrollar el simulador, luego este se explica a continuación, estos se hicieron con el software llamado Matlab, Luego se habla sobre el software educativo, sus alcances y evaluación de este, por último se expone el módulo de implementación, sus objetivos y alcances

3.1 Simulación Y Modelización

Para Cala Vitery (2016) Define la *simulación* como *el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con el mismo con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un criterio o conjunto de ellos, para el funcionamiento del sistema.* Mientras que para (Hoeger, 2007) la *simulación* es crear un modelo que aproxima cierto aspecto de un sistema del mundo real y que puede ser usado para generar historias artificiales del sistema, de forma tal que permite predecir cierto aspecto del comportamiento del mismo. Es decir que la simulación admite modelar un fenómeno a partir de un sistema, esto es una ventaja ya que es la capacidad de ensayar tantos sistemas reales existentes, como aquellos que no han sido materializados, en otras palabras, aquellos que están aún en desarrollo. Cabe destacar que, las diferencias generadas con la modelación radican en que esta parte de un sistema netamente real y lo convierte en patrones o formulas en que los resultados o valores no se alteran mucho de la realidad que ya se conoce (Hoeger, 2007). Ahora para (Rios Insua, Rios Insua, & Martin Jimenez, 2000) La *modelización* relaciona los sistemas reales y los modelos para estudiar la valides de estos, es decir la forma en que un modelo representa un sistema real. (Figura 3.1).

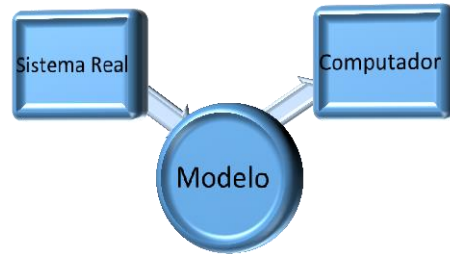


Figura 3,1 Elementos Básicos y relaciones en modelización y simulación Fuente El autor

Teniendo en cuenta las definiciones anteriormente descritas, La simulación permite representar un fenómeno natural aproximándose a través de un modelo matemático, el cual acerca al evento que puede ser reproducido por un programa que recrea las condiciones del fenómeno a estudiar. En este caso el programa se va a desarrollar en Matlab cuyo nombre significa “laboratorio de Matrices” (Ortegon, 2002) , Es un lenguaje para computación científica, análisis de datos, su visualización, el desarrollo de algoritmos. Su interfaz propone, por un lado, una ventana tipo de consola interactiva para ejecutar comandos, y por otro lado, un entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para la programación de aplicaciones, esta herramienta computacional es muy útil a la hora de desarrollar simulaciones de modelos matemáticos y sistemas físicos, También posee unas bibliotecas de funciones de campo particulares como son las de procesamiento de señales, Análisis Estadístico, optimización, etc. Finalmente de acuerdo con los razonamientos que se han venido desarrollando, para este trabajo que pretende comparar un sismo tornillo observado en el VG con un sismo sintético generado con el modelo matemático de Helmhontz, a continuación se va a hacer una descripción acerca de las condiciones del modelo que permiten generar el sintético.

3.2 Composición del Modelo

Cabe agregar que se va a explicar la ecuación diferencial que se va a modelar la cual es la 2.25, con las consideraciones que se van a tener en cuenta para simular el resonador²⁵ como una mezcla binaria de gases con sus respectivas condiciones, a fin de poderse acercar a la forma de onda de una señal de tipo tornillo del VG.

Para empezar a modelar la ecuación mencionada anteriormente se debe realizar una restricción la cual consiste en tener una fuerza que no varíe en el tiempo, Ahora, para llegar a esa expresión se considera una pequeña masa de gas que se denomina m la cual se le aplica un pulso de presión, esta se desplaza una distancia l hacia la derecha, (ver figuras 2.4 (d); y (e)), como consecuencia la presión interna desciende y esto hace que se obtenga una fuerza que desliza la masa del gas hacia su posición de equilibrio, este fenómeno se denomina fuerza de restitución F_l el cual es generado por las compresiones y expansiones del gas al interior del dispositivo y es muy similar a la del resorte. Y esta viene dada por la expresión.

$$F_l = -dpS \quad (3.1)$$

En cuanto a la variación de presión al interior del dispositivo está vinculada por la variación de volumen del mismo, por tanto despejando el valor de la variación de presión en (2.2) y reemplazando en (3.1) se obtiene la siguiente ecuación:

$$F_l = B \frac{\Delta v S}{V_0} \quad (3.2)$$

Donde

$$\Delta v = SL \quad (3.3)$$

En este caso se toma la longitud del cuello, esta pretende evitar los efectos de borde que hay en los extremos (Maricer, 2009), reemplazando (3.3) en (3.2) y esta última en $F(t)$ de (2.25) se obtiene la ecuación diferencial a modelar. Teniendo en cuenta que las unidades del sismo observado se encuentran en micro-metros ($10^{-6}m$), se realiza la conversión de

²⁵ Para ver el código con el cual se construyó el sismo sintético generado con el modelo de Helmholtz puede consultar el Anexo 6

unidades respectiva, Después se soluciona la ecuación (2.25) a través del método de Runge Kutta de cuarto quinto orden por medio de la función de Matlab ode45 sujeto a las siguientes condiciones iniciales: $t = 0$; $x(0) = 0$; $x'(0) = v_{inicial}$; Así mismo las variaciones de presión en el orificio del tubo hacen transferencia de momentum a la masa de gas que se encuentra en el cuello, por tanto la velocidad inicial de la partícula es igual al producto entre la velocidad del sonido, el número de Mach²⁶, Y por último un factor experimental²⁷, el cual se obtiene con el promedio de las amortiguaciones de los sismos tornillo (Konstantinou , 2015), Por último, las condiciones del gases, el tipo de parametrización que se hace para aproximarse a un sismo tornillo desde el modelo de Helmholtz, se toman las consideraciones de (Hellweg & Seild, 2003) que a continuación se van a describir.

En relación con la parametrización se efectúa a partir del *coeficiente de conductividad de Rayleigh* el cual la autora plantea a partir de la siguiente expresión matemática:

$$k_r = \frac{2C}{Q_o f_o} \quad (3.4)$$

Donde Q_o es el factor de calidad de la frecuencia observada y f_o es la frecuencia observada que se determina a partir de la información generada en el sismómetro, a partir de estos parámetros expresados anteriormente el volumen del resonador es:

$$V_o = \frac{C^3}{Q_o f_o^3} \quad (3.5)$$

Después de definir estas variables se procede a representar las condiciones con las cuales se encuentra el resonador para luego compararlo con el sismo observado, se tiene una mezcla bifásica de 20 % de Gas Carbónico y un 80% de Vapor de agua, Luego la velocidad del sonido de esta es de 560 m/s, a una temperatura de 723 Kelvin, con una presión de 5 MPA, Un diámetro del cuello resonador de 15 m, Un factor de calidad de la frecuencia observada de 100, y una frecuencia observada de 1.82 HZ. Luego de modelar la ecuación con las condiciones anteriores, haciendo una distribución de tiempo, se integra la

²⁶ El número de match utilizado para la simulación fue de 4.85×10^{-5}

²⁷ El factor experimental corresponde a 0.35 (Konstantinou , 2015)

señal con el fin de hallar la velocidad, para este fin se utiliza el método del trapecio a partir de la función cumtrapz, Por último se compara visualmente con el sismo observado el día 3 de marzo de 2000 en la estación ANG del VG.

Para Terminar, con el modelo de la ED explicado anteriormente, en la cual se halla el volumen del resonador a partir de la ecuación 2.24a, se desarrolla el simulador que se va a llevar al aula con las condiciones termodinámicas de los gases utilizadas por (Chouet & Kumagai, 2000) (Ver Anexo7), este se va a desarrollar en MATLAB a partir de un GUI. En ese mismo sentido, la idea del simulador es desarrollar una herramienta educativa la cual haga posible que el estudiante manipule un modelo de la realidad y visualice los efectos producidos al modificarse, esto con el fin que el estudiante se acerque al suceso y eso hace que este afine su propio concepto sobre lo sucedido, luego dada la importancia que tiene este simulador para describir el fenómeno, A continuación se va a explicar la construcción y el funcionamiento de este.

3.3 El simulador

Teniendo en cuenta el modelo anterior para simular el comportamiento del gas, con el mismo software se construirá el simulador que se llevara a aula con una aplicación de Matlab conocida como GUI (Graphical User Interfaces) la cual es una interfaz gráfica donde es el espacio de dialogo entre el usuario y computador con el objetivo de intercambiar información en condiciones de alta eficiencia, facilidad de uso y calidad estética (Ortegon, 2002) , por tanto posee características de los programas visuales como Visual Basic o visual c++, es decir GUIDE permite colocar botones, graficas, listbox y otros elementos idénticos a los vistos en los programas anteriores.

Así pues, el simulador consiste en tres formularios que se pueden ver en la figura 3.2 en los cuales se muestran la señal de dos resonadores los cuales recrean tres casos, en el primer caso se muestra la señal en cada ventana grafica de un gas monofásico, en el segundo caso se muestra en la primer ventana la gráfica del gas de un resonador que se encuentra con un gas monofásico y en la otra ventana se encuentra con un gas bifásico o mezcla, para el último caso se encuentran las señales de dos resonadores que muestran

gases bifásicos o mezclas, Ahora para observar las propiedades de los gases cuando estos están sometidos a diversas presiones temperaturas, y diferentes tipos de gas o mezcla, el GUI posee tres selectores, los cuales muestran la presión que se encuentra entre 5 Mega Pascales(MPA), 10 MPA y 25 MPA , la temperatura cuyos valores se encuentran entre los 800, 1200 y 1600 Kelvin, y el tipo de gas a modelar para cada caso, por otro lado tiene dos botones los cuales uno es el que grafica la señal, y el otro despliega un mensaje de caja el cual muestra las dimensiones del resonador, como su densidad y su velocidad del sonido, también posee tres menús desplegables, en el menú “Abrir” se despliega las opciones de cambios de simulación y cerrar el programa, luego en el menú “Mostrar” se despliega las opciones de graficar el gas como los resultados para cualquiera de los dos casos e incluye la opción transformada de Fourier para las opciones anteriormente descritas y en el menú “Ayuda” pretende explicar el funcionamiento del programa, por ultimo tiene dos ventanas donde el usuario ingresa por teclado la frecuencia y el radio del resonador terminando que posee otra ventana en el caso de las mezclas donde se ingresa la fracción molar , ahora para el primer caso se va a evaluar que sucede con la señal de dos resonadores con un gas, en este caso en el selector de gases aparecen los tres gases que se encuentran con mayor frecuencia en un volcán como son el Dióxido de Azufre, Gas Carbónico y Vapor de Agua ,Así mismo, el segundo caso pretende evidenciar el comportamiento de dos resonadores, uno con un solo gas y el otro con una mezcla de los gases que se estudian con mayor frecuencia en el volcán como son dióxido de azufre - vapor de agua, gas carbónico - vapor de agua, Vapor de agua-agua, esta última posee una ventana donde el usuario ingresa la fracción molar del gas. Por ultimo dos resonadores, ambos con una mezcla de los gases anteriormente nombrados. Ahora el procedimiento y las fórmulas que permiten determinar las dimensiones del resonador como las propiedades del gas que se modifican se pueden ver en el anexo 4.

Dicho lo anterior el funcionamiento de la simulación consiste en que el usuario después de seleccionar la presión, la temperatura y el tipo de gas o su mezcla, ingrese por teclado los valores de frecuencia que no pueden menores de cero, ni mayores de 20 Hz, radio del resonador el cual no debe ser menor de cero y para las mezclas el valor de la fracción molarlas cuales se encuentran entre valores cercanos a cero y uno.

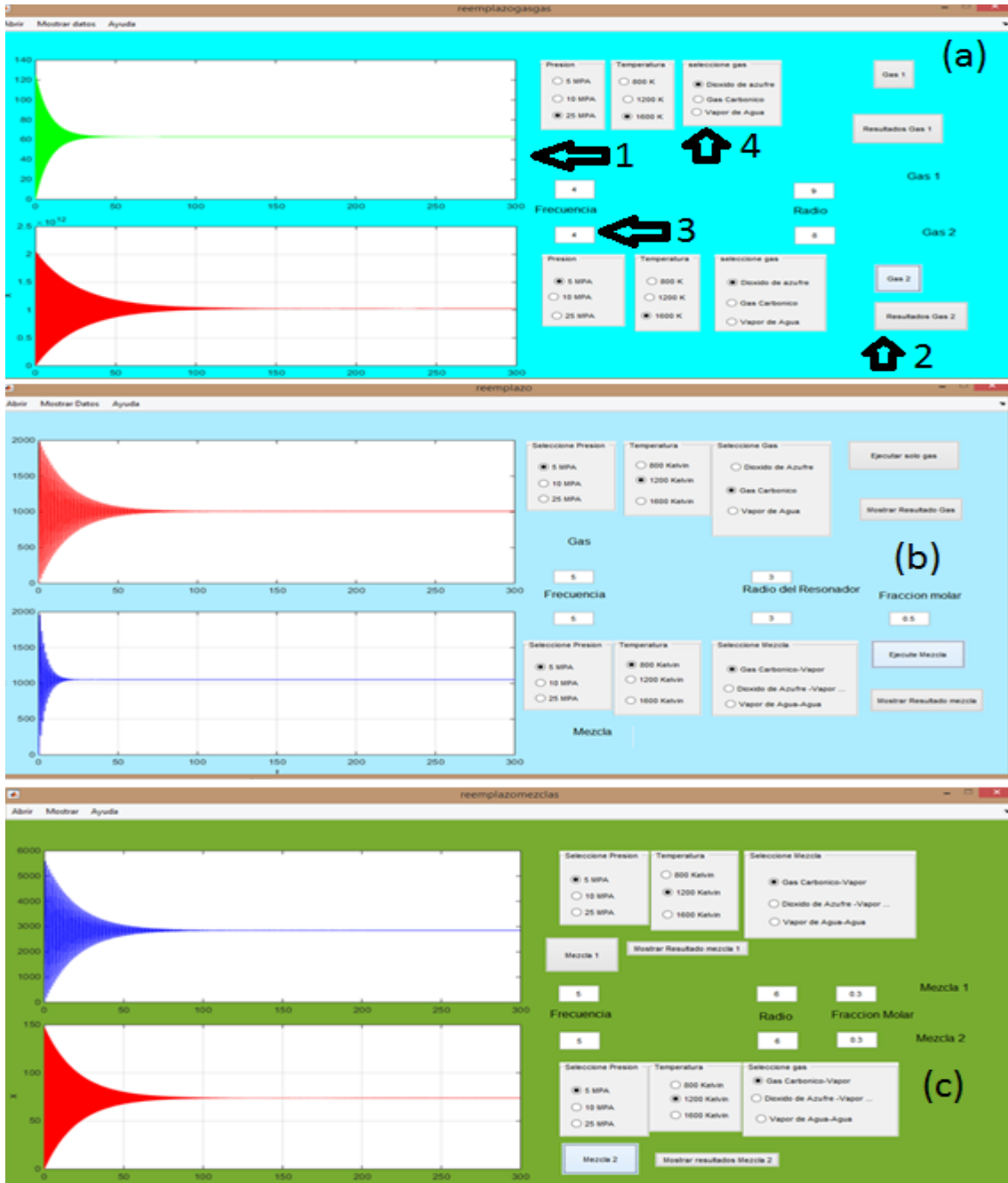


Figura 3,2 (a) interfaz que representa la señal de un gas con sus respectivos selectores de presión, temperatura y Gases, botones que generan la señal y los resultados, con su respectivo ingreso de datos de radio de resonador y frecuencia donde 1. Ventana grafica; 2. Botón de salida de resultados; 3. Ventana de ingreso de valores; 4. Selector (b) simulación de un gas con una mezcla binaria, (c) simulador de dos mezclas Fuente El Autor.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo dicho por (Chiarani & Lucero, 2005) donde se plantea la necesidad de hacer una evaluación software educativo (SWE) de este por parte de los

profesores y alumnos, ya que todo SWE está diseñado para que funcione en un contexto formativo y este se rige bajo una serie de variables como son las de profesor, alumno, aula y medios, este tipo de valoración se conoce como “evaluación en el contexto de utilización” (Llorrente Cejudo, 2017) .Por tanto se va a explicar la importancia de la evaluación del SE, su definición y los puntos a evaluar.

3.4 Software Educativo y su evaluación

El SWE, se define como un programa de computador cuya finalidad específica es facilitar los procesos de enseñanza y aprendizaje (Cova, Arrieta, & Aular de Duran, 2008), Ahora. en el Aula se requieren nuevas formas de enseñar y aprender, donde las (TICS) proporcionen espacios más motivantes y creativos, es por eso que se debe hacer una retroalimentación cuando se implementa un programa dentro de un aula, ya que es una guía hacia las posibilidades de aplicación del producto y como fue trabajado por los alumnos, Es evidente entonces que la importancia de la evaluación del software(SW) radica en que se debe conocer sus ventajas y desventajas en la calidad del contenido, en el proceso de enseñanza aprendizaje, facilidad de uso, pertinencia de los contenidos y su interactividad, además de una retroalimentación que hacen los usuarios con el fin de realizarle mejoras al programa y ver qué opinión tienen estos acerca del SW.

Cabe resaltar que hay varios elementos a tener en cuenta a la hora de valorar SE entre los que se hallan según la clasificación de (Chiarani & Lucero, 2005) en los técnicos, los pedagógicos y los funcionales. Ahora desde la perspectiva técnica están: El computador y sus dispositivos. Desde los aspectos pedagógicos: el contenido, los objetivos educativos, la comunicación, etc. Finalmente desde las formas funcionales se consideran: las fortalezas y debilidades del SW, y el diseño que se presenta de este.

Así pues, para buscar una escala de evaluación para el SWE, se utilizara la gradación de (Barroso, Medel, & Valverde, 1997), la cual considera una valoración sistemática que facilita la toma de decisiones, para su uso respectivo, esta escala se utiliza para evaluar las formas funcionales del programa, así mismo, esta se desarrolla a través de un cuestionario de preguntas de tipo cerradas cuyas opciones de respuesta son: muy adecuado, adecuado, poco adecuado y nada adecuado.

En cuanto a los aspectos pedagógicos teniendo en cuenta lo dicho por Ramos (1998) afirma que el docente como facilitador de los procesos de aprendizaje juega un importante papel, pues de su conocimiento, manejo de la información y uso de procesos educativos en un contexto de inclusión tecnológica depende el uso que éste haga de la tecnología y en consecuencia su aprovechamiento en el ámbito educativo, por tanto debe haber un apoyo por parte del docente con el fin de hacer un uso adecuado del SWE,

De la misma forma las TICs pueden ser un puente a la hora de resolver un problema en el aprendizaje ya que posee dos características que ayudan en la comprensión de este que son las siguientes:

- 1- Las imágenes que genera el programa pueden ser fácilmente utilizadas en la enseñanza y la mejora de la memoria retentiva de los estudiantes.
- 2- Los profesores pueden explicar fácilmente las instrucciones complejas y asegurar la comprensión de los estudiantes. (Elmo, 2016)

Por otra parte, la simulación es una metodología aplicada que permite describir el comportamiento de un sistema y es determinístico (Cataldi, Lage j, & Dominighini, 2013). Es decir, puede ser predecible su siguiente salida de información con condiciones iniciales previamente establecidas. Por ultimo para este trabajo se recurrirá al uso de las simulaciones con el fin de evidenciar el comportamiento de los gases, para analizar que influencia tienen las variables de estado como son la presión, la temperatura sobre las variaciones de la velocidad del sonido cuando se altera la densidad de los gases a estudiar. A continuación se va a explicar el modulo con el cual se busca la implementación en el aula del programa, la implicación de este con el estudio de los fluidos. Teniendo en cuenta el comportamiento de estos como el comportamiento de estos a partir del movimiento de la masa en un resorte encerrado en un fluido y su relación con los gases.

3.6 Modulo

3.6.1 Objetivos del Modulo

- Reconocer a partir de la manipulación de algunas variables de estado como son la presión y la temperatura en el programa, los cambios que se generan en la morfología de una forma de onda de gas.
- Interpretar a partir de la simulación cómo el cambio de la temperatura en un gas puede modificar algunas características de las propiedades de fluido.
- Conocer otro tipo de aplicación de las ED de segundo orden.
- Evaluar el simulador en cuanto a su diseño, sus partes y que mejoras los usuarios sugieren en cuanto al funcionamiento de este.
- Establecer una relación entre el resonador de Helmhontz y un sistema masa resorte sumergido en un líquido

3.6.2 Descripción del Modulo

El inicio de la implementación del módulo comienza con una introducción acerca del resonador de Helmhontz, sus partes y la relación existente entre un sistema masa resorte, de ahí se explica la ecuación diferencial la cual modela el fenómeno, luego se muestra una aplicación del modelo matemático comparándolo con una onda sísmica volcánica denominada Tornillo, luego se da una introducción acerca del funcionamiento del simulador, esto con el fin de mostrarle al estudiante otro programa diferente a los que conoce, en este caso Matlab. Además de mostrarle como a partir del simulador se puede modificar las variables de estado que le sucede a la forma de onda.

Después de hacer la introducción al tema se les pide a los estudiantes que hagan una evaluación del SWE, a través de un cuestionario que se encuentra en el anexo 7, y se diseña teniendo en cuenta las formas funcionales las cuales son: Tamaño de la fuente, Fondo del Programa, Ingreso de las variables, Salida de Resultados, Gráficos del Programa, Distribución de los objetos del programa, estos se valoran teniendo en cuenta la escala de calificación planteada por (Barroso, Medel, & Valverde, 1997) , y se les pide que den sugerencias sobre cómo mejorar el SW .

Por otra parte, realizada la actividad de evaluación se procede a desarrollar dos actividades haciendo uso del programa, la primera actividad busca analizar el comportamiento de un gas cuando se manipulan las variables de frecuencia, radio, temperatura y el tipo de gas a modelar, En cuanto a la simulación se va analizar el primer caso donde se tienen las señales de dos resonadores que se encuentran con un solo gas, en esta parte se propone que se deje una variable fija en un gas y en el segundo caso se alteren las otras variables sugeridas anteriormente, esto con el fin que ellos puedan aproximarse a los cambios del gas y los expliquen en una tabla, Después de realizada la actividad, El siguiente ejercicio consiste en que expliquen cómo son las dimensiones del resonador, lo grafiquen comparándolo con el resonador que se dejó con las variables fijas y describan como son esos cambios, luego se les pide que representen gráficamente el fenómeno como si fuera un sistema masa resorte y lo expliquen, finalmente escriban las ecuaciones diferenciales que modelan su resonador.

Materiales y Tiempo de Duración: Computador y 2 Horas.

3.6.3 Resultados esperados:

-Que los alumnos puedan relacionar una aplicación vista en el curso de ED como es un sistema masa resorte en un fluido con el resonador a través de la simulación, esto se debe evidenciar con una explicación a partir de una analogía de un sistema masa resorte inmerso en un fluido

-Los estudiantes del curso de ED con la información generada en el simulador deben representar gráficamente como debe ser las posibles dimensiones del resonador, tanto al variar las variables de estado como presión y temperatura, como al variar su frecuencia y el radio del resonador.

-Los estudiantes del curso de ED deben escribir a partir de la información generada por el programa como es la ecuación diferencial de segundo orden que modela la onda o señal al variar su frecuencia, radio, Temperatura y gas.

-Los estudiantes conozcan otro tipo de interfaz que no se ha trabajado en los cursos de programación del departamento de física de la UPN y que interactúen con ella, esto se debe reflejar en las respuestas que estos generan al igual que sus conclusiones

- Los usuarios evalúen la interfaz a través de un cuestionario donde se les va a preguntar acerca de las formas funcionales del software y den sugerencias sobre este con el fin de realizar una retroalimentación sobre el programa.

Capítulo 4. Análisis y resultados

En este capítulo se van a reproducir las señales con las condiciones planteadas por (Hellweg & Seild, 2003) comparando los sismos sintéticos generados por los anteriores autores con respecto al modelo de Helmholtz y con un sismo observado en el VG. Luego se analizan los resultados de la implementación de la simulación en el curso de ecuaciones diferenciales de la UPN.

4.1 Comparación del sismo Tornillo con la señal generada del modelo de Helmholtz

Teniendo en cuenta las tres formas de onda generadas se puede apreciar visualmente en la figura 4.1, se puede observar que las formas de onda son muy similares como las velocidades iniciales del sintético generado con el resonador con respecto al sismo observado, por otro lado, considerando que el sismo de la figura 4.1 (c) se modelo con un oscilador no lineal de Van der pool, diferente al modelo de Helmholtz. Este sintético se genera a partir de la siguiente ED:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x - 1) \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0 \quad (4.1)$$

Donde ω es la velocidad angular, μ representa un parámetro de no linealidad y amortiguación, este término cuando se encuentra con valores cercanos a cero y menores de uno significa que el modelo se comporta de forma amortiguada no lineal, ahora bien, este modelo es muy similar al desarrollado en la ecuación 2.25 donde la diferencia es que el modelo de Helmholtz se comporta de forma lineal, así mismo Hellweg (2003) plantea que para una frecuencia de 1.5 Hz, tanto para un μ de 0.25 como de 0.5, las formas de onda generada por el modelo se aproximan al sismo observado, Siendo así se procede a comparar los sintéticos formados de la ecuación 4.1 con respecto al creado por el modelo de Helmholtz

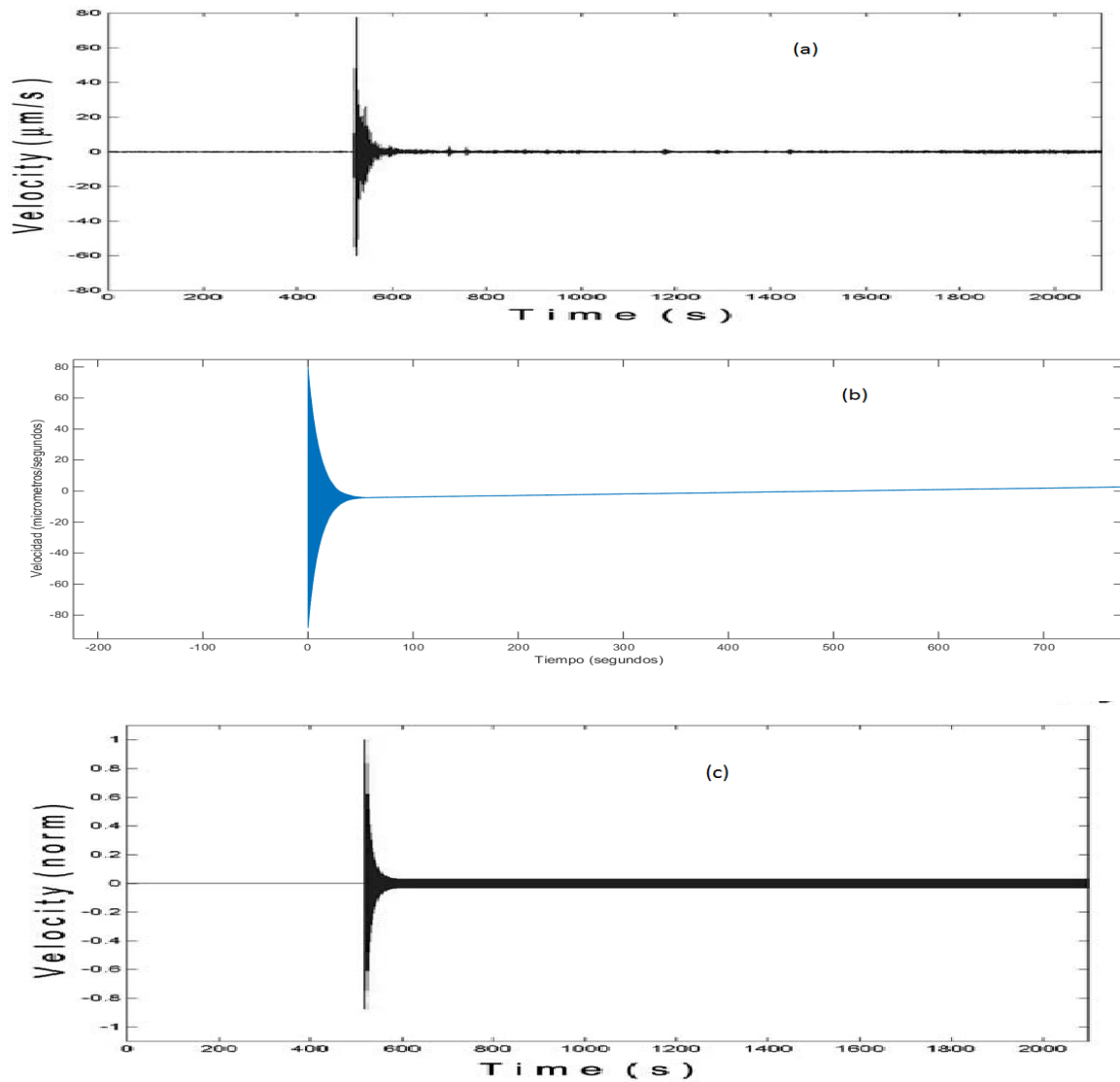


Figura 4,1 (a) sismo tornillo observado en el VG detectado en la estación ANG el día 3 de marzo del 2000 a las 21:20 con una frecuencia de 2 Hz (Hellweg & Seild, 2003). (b) Sismo sintético generado con la frecuencia observada de 1.82 Hz, modelado a partir del modelo de Helmholtz por medio del método numérico de Runge Kutta de Cuarto-Quinto Orden, ahora la frecuencia generada en el resonador es de 11.91 Hz Fuente El Autor. (c) Sismo sintético generado a través de un oscilador no lineal de Van der Pool con una frecuencia de 1.5 Hz con un μ de 0.25 (Hellweg & Seild, 2003).

Así mismo al comparar las formas de onda se observa que los tiempos en que decae la señal no sobrepasan los 50 segundos, tanto las generadas por el modelo de Van der Pool como el de Helmholtz como se puede ver en la figura 4.2, por tanto se puede afirmar que el sismo sintético generado por el resonador se aproxima a la forma de onda del sismo

observado, Sin embargo la simulación del sismo sintético por medio del modelo de van der Pool posee una serie de inconvenientes a la hora de hacer la interpretación del fenómeno físico que ocurre dentro de los fluidos al interior del volcán debido a que como el coeficiente de amortiguación es variable y genera la misma señal, no hay certeza de las condiciones a las que se encuentra el gas, ni como es el comportamiento de este al interior del conducto volcánico, mientras que con el modelo de Helmholtz se puede afirmar que es una burbuja o cavidad de vapor de agua y gas carbónico que viaja por un tubo, la cual al recorrer este comienza a implosionar, para describir ese proceso se puede tener un resonador cuyas posibles dimensiones sean: un volumen de cavidad de 14758 m^3 y una longitud del tubo de 769 m, aunque no se conoce que exista un resonador con esas características al interior del volcán, el tamaño de esta es posible que se encuentre dentro del aparato volcánico.

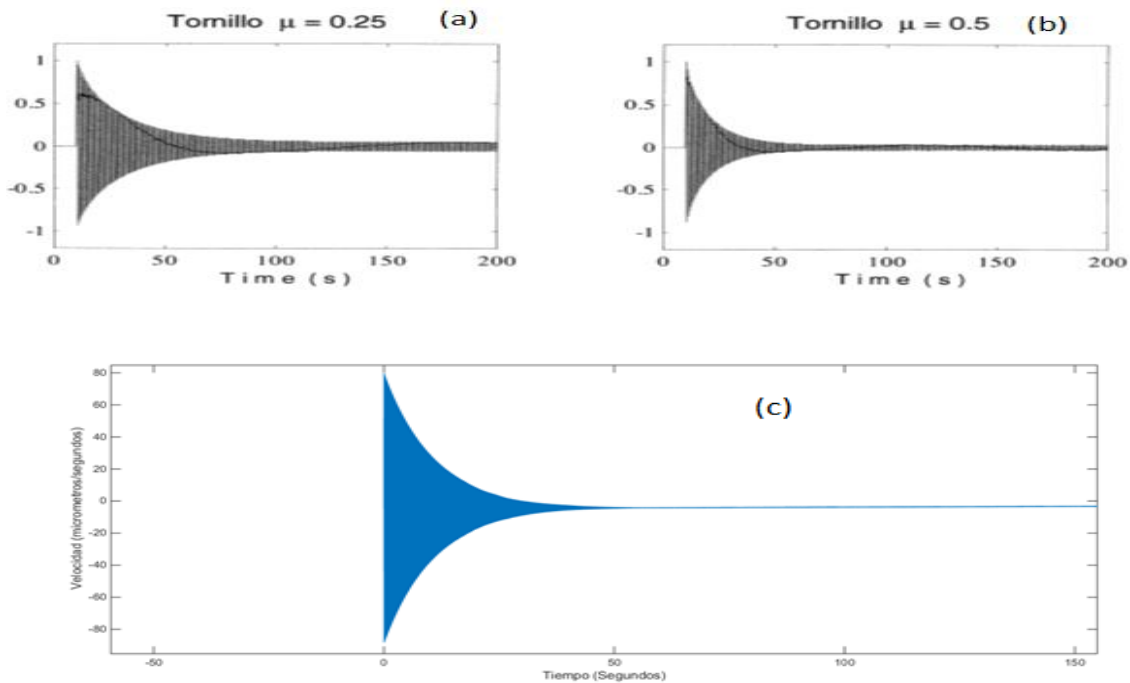


Figura 4,2 (a) Sismo sintético generado con el modelo de van der pool con un $\mu = 0.25$, (b) Sintético creado con el mismo modelo con $\mu = 0.5$ (Hellweg & Seild, 2003) (c) Sintético Generado con el modelo de Helmholtz Fuente el Autor

Vale la pena decir que el efecto no lineal que se observa en este sismo tornillo se debe a múltiples factores como: Flujos transitorio e inestable debido a los cambios de fase del gas, tipos de condición de frontera en el conducto, También está la transición de flujo turbulento a estado de transición, es decir hay un periodo en el cual el fluido cambia a comportarse de una turbulencia a una lámina (Hellweg & Seild, 2003), Ahora comparando la señal generada con el resonador (ver figura 4.2 c) se observa que a partir de los cincuenta segundos, la velocidad es cero y se mueve en el tiempo, (White F. M., 1983) afirma que ese tipo de comportamiento se presenta cuando el fluido se comporta de manera laminar, es decir en este caso cuando la burbuja se aplasta, a partir de los 200 segundos hay una pequeña inclinación como se ve en la figura 4,1 b, se puede pensar que la lámina comienza a desplazarse por el tubo o que esa pequeña inclinación se debe a que puede haber un periodo de inestabilidad dentro del fluido, muy cercano a lo que sucede con la señal, luego al tener una cantidad de estas señales las cuales representan burbujas que están continuamente colapsando sobre el conducto volcánico, hay un momento en que este se fatiga, generando una ruptura y un escape de material, de ahí se genera las erupciones volcánicas, donde dependiendo de los eventos históricos registrados en los cuales esté involucrada esta cantidad de señales con las erupciones del aparato volcánico, de ahí se generan las alertas de vigilancia sísmica. Finalmente se va a explicar los resultados de la evaluación del software educativo y su implementación



Figura 4,3 Proceso de cavitación de una burbuja de vapor, la cual al aplastarse golpea la pared del tubo generando una fisura dentro de este. (White R. , 2016)

4.2 Resultados de la implementación

4.2.1 Resultados de la evaluación del SW

Se realizó la evaluación del software a partir de un cuestionario el cual fue contestado por 21 personas, cuyos resultados son los siguientes:

Tabla 4.1

Resultados de evaluación del software educativo

ELEMENTOS	MUY ADECUADO	BASTANTE ADECUADO	ADECUADO	POCO ADECUADO
Tamaño de la fuente	1	2	16	2
Fondo del programa		7	5	9
Ingreso de valores	8	9	2	2
Salida de Resultados	4	11	5	1
Gráficos del programa	13	4	3	1
Distribución de los objetos del programa	7	6	7	1

Tabla de resultados que representa la cantidad de estudiantes que contestaron cada opción.

Teniendo en cuenta la información generada en la tabla, en cuanto al tamaño de fuente 16 de 21 personas, esto es equivalente al 76.19% afirmaron que esta era adecuada, en cuanto al fondo del programa 9 de 21, es decir el 42.85 % de los estudiantes dijo que es inadecuado, prueba de ello son las observaciones del estudiante Juan Manuel Peña Díaz el cual afirma: *Recomendaría un color de fondo más suave, el azul es muy brillante y me irrita los ojos, Los resultados serían mejores con una fuente mayor,* También la estudiante

Andrea Vargas Moreno dice: *Mi recomendación es que el tamaño de la fuente sea un poco más grande, y que el color sea más oscuro, un color tierra (café, gris,...), mientras que* Didier Stiven Figueredo argumenta que: *hacer un poco más visible o más grandes la ventana de resultados, cambiar el color del fondo que me parece un poco “chillon”*. Por Ultimo Paula Andrea Bernal Sánchez expone: *Cambiar el color del fondo por uno más opaco, le da más seriedad al programa, la fuente debe ser más grande*, esto muestra que colores muy fuertes como el azul claro el cual está desarrollada la simulación (ver figura 4.2. a) es molesto para los ojos del usuario, además los colores tierra como sugiere la estudiante Andrea Vargas pueden mejorar la visualización de resultados, en cuanto a la fuente a pesar que el 76.19% de estudiantes afirmo que era adecuada, todas las sugerencias apuntan a mejorar ese aspecto en el programa, en cuanto a las otras variables como ingreso de valores, salida de resultados y distribución de los objetos la que salió mejor calificada fueron los gráficos del programa, la cual muestra que 13 de los 21 estudiantes, ósea él 61.9 % aprueba que el software genera una serie de gráficos que son muy claros a la hora de presentar los resultados, esto se evidencia en la recomendación dada por el estudiante Ronald José Rincón Urrea el cual afirma: *El programa es amigable al usuario, resulta fácil de entender y contextualizarse. Incrementar el tamaño de la fuente*. Otra respuesta interesante es la de Cristian Rodrigo Pulido Daza que dice: *Es una simulación organizada y adecuada ante la física del asunto, y la química que es cónyuge en cuanto a los gases y sus propiedades. Me parece acertado y muy adecuadas las gráficas de la interface*. Finalmente dentro de las recomendaciones que dan los estudiantes para mejorar el SW llama la atención la recomendación hecha por John López donde afirma que *Cada grafica que se ejecute se pudiera guardar o una vista disponible para seguir combinando datos y poder compararlos*, Siguiendo este orden de ideas se tiene la observación de Duvan Felipe Leguizamón Baquero, que propone *Colocar 3 gráficas para hacer mejor análisis, si hay tres graficas se podrán trabajar los gases con más facilidad*, esto para mostrar los gráficos de la transformada de Fourier para una mayor y mejor interpretación Por último la recomendación que hace Oscar Javier Fuentes Medina es *se podía dar una mejor distribución de los objetos del programa con el fin de mejorar el entendimiento del mismo*, finalmente, las sugerencias que plantean ellos son interesantes y pueden ser una guía para que se puedan realizar mejores interfaces graficas de usuario que se puedan llevar a aula.

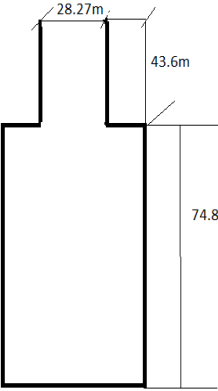
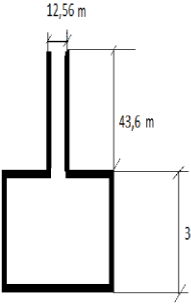
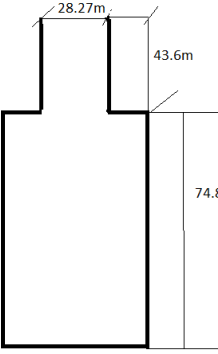
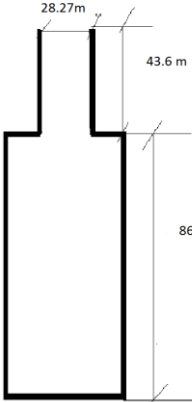
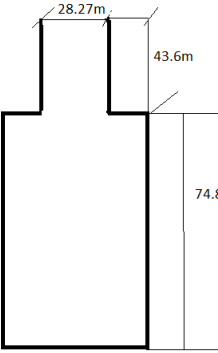
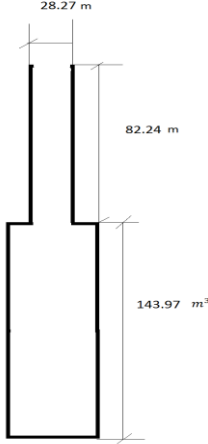
4.2.2 Resultados sobre la interpretación del programa

Considerando la configuración sugerida en la Guía que se puede ver en el anexo 8, para cada uno de los siguientes casos, donde el Gas 1 no se modifica sus variables, luego que los estudiantes del curso de ED realizaron la primera actividad de la guía a continuación con esos datos se realizara los ejercicios de la actividad 2 de la guía que se van a discutir que son: el primero dibujar las posibles dimensiones del resonador y explicar su comportamiento, el segundo ejercicio es establecer una analogía con un modelo masa resorte sumergido en un fluido y por ultimo escribir la ecuación diferencial, A continuación en el siguiente cuadro se va mostrar las respuestas esperadas con la configuración mostrada en la tabla 4.2.

Tabla 4.2

Respuestas esperadas de los estudiantes actividad 2.1

Casos	Representación Gráfica del resonador para gas 1	Representación gráfica para gas 2	Descripción de cambios y conclusiones
Caso 1			<p>Comparando los dos resonadores que están a la misma temperatura y con el mismo gas, se puede afirmar que el resonador para gas 2 las dimensiones tanto de la longitud del cuello, como el volumen de este son menores, siendo que la frecuencia es mayor, por tanto a mayor frecuencia, menor dimensión del volumen y la longitud del cuello</p>

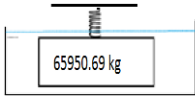
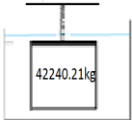

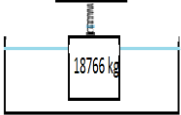
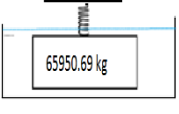

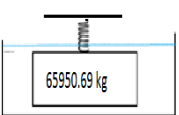
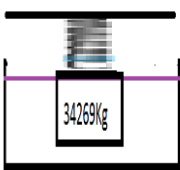
Caso 2			<p>Los gases se encuentran en la misma condición de temperatura y tipo de gas que hay en el primer caso, estos vibran a la misma frecuencia, luego, se puede observar que las longitudes de los cuellos de ambos resonadores no variaron, sin embargo al reducir el radio del resonador del gas 2, el volumen de este también se reduce, por tanto se puede afirmar que hay una relación de proporcionalidad directa ente ambas dimensiones</p>
Caso 3			<p>Las condiciones del gas cambian para el resonador dos al incrementar la temperatura del gas contenido en este, esto hace que la densidad del sea de $24.05 \frac{Kg}{m^3}$ y su velocidad del sonido es de $436.25 \frac{m}{s}$ con respecto al primer gas que es de $32.05 \frac{Kg}{m^3}$ y una velocidad del sonido de $503.74 \frac{m}{s}$, ahora, tanto las dimensiones del cuello como las del radio no variaron, luego el cambio se dio en el volumen de este, ahora, en conclusión a mayor temperatura y volumen, menor densidad</p>
Caso 4			<p>En este caso se mantuvieron las mismas condiciones de presión, temperatura, frecuencia y radio en ambos Resonadores, lo único que vario fue el tipo de gas para el resonador 2, esto dio como consecuencia que la densidad del vapor de agua sea de $9.01 \frac{Kg}{m^3}$ y su velocidad del sonido es de $822.14 \frac{m}{s}$, luego, al ser menos denso el gas 2 con respecto al gas 1, esto hizo que la longitud del cuello como el volumen del resonador donde están el gas 2 aumentaron considerablemente, por tanto se puede afirmar que a menor densidad, mayor volumen y mayor longitud del cuello.</p>

En cuanto al desarrollo de la implementación en el curso de ED, se desarrolló en grupos de tres personas, los cuales generaron en total ocho grupos de trabajo, luego, todos los grupos hicieron la primera actividad, ahora para la segunda actividad con respecto al primer ejercicio las respuestas generadas para cada caso fueron muy similares, en cuanto al primer punto de la actividad dos que correspondía en representar gráficamente los dos resonadores y explicar cómo sus dimensiones cambian al alterar algunas variables propuestas y explicar el cambio de esas dimensiones relacionando el comportamiento del gas, eso dio como consecuencia, que 7 de los 8 grupos, es decir el 85 % dibujaron los resonadores, Ahora. Teniendo en cuenta este subconjunto de población, cuatro de los siete grupos, es decir el 52% dibujaron los resonadores muy aproximados a los que se encuentran en la tabla 4.2, mientras que el 48% dibujo los resonadores sin tener en cuenta las dimensiones de este, en cuanto a las explicaciones que dieron al comportamiento del resonador, 5 de los 7 grupos, es decir el 71 % dieron una respuesta aceptable, mientras que 1 de 7, Osea el 14,28 % dieron una respuesta muy aproximada a las que se estaban buscando, mientras el otro 14.12% dio una respuesta equivocada. Por tanto, aunque el 52% dibujo de manera acertada el resonador con los datos generados por el programa, solamente el 14.28 % dio una respuesta muy aproximada.

En cuanto al segundo punto de la actividad dos de los siete grupos, solo cuatro desarrollaron ese punto, es decir el 57.14% , de los cuales uno de los cuatro, ósea el 25%, se aproximó a las respuestas esperadas que se encuentran en la tabla 4.3, mientras que dos de cuatro, eso es equivalente al 50%, dieron respuestas aceptables a la pregunta, mientras que el restante 25% no respondieron acertadamente a lo que se les pedía, esto quiere decir que el estudiante solamente conoce la aplicación de la ED, pero no conoce el fenómeno físico que está detrás, se podía pensar que para responder de manera asertiva la actividad debería haber hecho alguna actividad experimental que le permita poder explicar el evento.

Tabla 4.3

Respuestas esperadas de los estudiantes actividad 2.2

Casos	Sistema masa resorte en un fluido para gas 1	Sistema masa resorte en un fluido para Gas 2	Descripción de cambios y conclusiones
Caso 1	$\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$ 	 $\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$	Los dos resortes están sumergidos en un fluido con la misma densidad, pero el sistema del segundo gas, al tener una masa menor y un resorte más pequeño, esto hace que su frecuencia de oscilación sea más alta y por tanto se amortigüe más rápido con respecto al primer sistema masa resorte
Caso 2	 $\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$	 $\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$	Se observa que se tienen dos sistemas masa resorte inmersos en un fluido de la misma densidad que vibran con la misma frecuencia para ambos casos donde el caso 2 el resorte genera menor oposición al movimiento que el primer resonador, prueba de esto es que la señal generada en el caso dos muestra un amortiguamiento mayor que en el gas 1
Caso 3	 $\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$	 $\rho_{gas}=24.05 \frac{Kg}{m^3}$	En el tercer caso se tienen dos sistemas masa resorte que oscilan con la misma frecuencia, ambos sumergidos en dos fluidos de la misma sustancia con diferente densidad, para el gas 1 el sistema es más denso, por tanto es menos viscoso que el gas 2, sin embargo, el resorte del sistema del gas 2 genera mayor oposición al movimiento, eso hace que las señales sean muy similares entre sí.
Caso 4	 $\rho_{gas}=32.05 \frac{Kg}{m^3}$	 $\rho_{gas} = 9.05 \frac{Kg}{m^3}$	Finalmente se tienen dos sistemas masa resorte que se encuentran sumergidos en diferentes sustancias, la sustancia del gas dos es menos densa que la primera señal, por tanto es más viscosa que la anterior, sin embargo la elasticidad que ejerce el resorte del gas 1 es mucho más alta que la del gas 2, por eso la amortiguación del sistema es más corta

Finalmente, el ejercicio que consistía en escribir la ecuación diferencial del resonador cuya respuesta esperada se encuentra en la tabla 4.4

Tabla 4.4

Respuestas esperadas de los estudiantes actividad 2.3

Casos	Ecuación diferencial resonador gas 1	Ecuación Diferencial resonador gas 2
Caso 1	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.069 \frac{dx}{dt} + 986.6x = 43048,50$	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.27 \frac{dx}{dt} + 50.26x = 68932,06$
Caso 2	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.069 \frac{dx}{dt} + 986.6x = 43048,50$	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.03 \frac{dx}{dt} + 31.41x = 43043,50$
Caso 3	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.069 \frac{dx}{dt} + 986.6x = 43048,50$	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.057 \frac{dx}{dt} + 31.41x = 49895,19$
Caso 4	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.069 \frac{dx}{dt} + 986.6x = 43048,50$	$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.012 \frac{dx}{dt} + 31.48x = 81262,56$

Los resultados arrojados de esta actividad fueron que 6 de los 8 grupos realizaron muy bien la actividad, es decir el 75 % de los estudiantes hicieron la actividad, de ahí 2 de los seis grupos, ósea el 33 % resolvieron la ED, en este sentido se destaca el grupo de Ana María Galarza, donde ellas solucionaron la ED y dicen lo siguiente: *A partir del trabajo se concluye que efectivamente, a partir de un sistema oscilador podemos determinar la ecuación del resonador, y de igual forma se puede decir que dependiendo lo que variamos así mismo se podrá comportar la gráfica como se veía en el primer punto, vale la pena decir que ellas al resolver la ED y comparar las gráficas generadas por el programa evidencian que este es bastante coherente a la hora de presentar los resultados y que la variable que se altere al interior del programa, así mismo varían las gráficas del mismo.*

Conclusiones

-El modelo del resonador de Helmholtz permite describir ondas sísmicas volcánicas de largo periodo de tipo tornillo, cabe destacar que este modelo permite explicar el comportamiento de las burbujas de gases al interior de un conducto volcánico, además genera unas posibles dimensiones del resonador que describen ese tipo de ondas. Ahora la importancia que tiene esta señal tiene que ver con un fenómeno particular que sucede en las burbujas conocido como cavitación, donde se generan cavidades de vapor que al cambiar de estado, golpea las paredes del tubo por donde recorre la burbuja, dejando una fisura en este, luego, dependiendo a la sísmica histórica del aparato volcánico, los observatorios vulcanológicos determinan a partir de ese sismo cual es la probabilidad que se rompa el tubo por donde viaja la burbuja y genere una erupción volcánica, de ahí es un indicador por el cual se generan las alertas.

- El modelo de Helmholtz de Cavidad permite describir el comportamiento elástico de los gases y las mezclas binarias de estos como es el caso de la mezcla para comparar el modelo de Helmholtz con el sismo observado, estableciendo una analogía con un sistema masa resorte con las partes del resonador.

- Las interfaces graficas de usuario (GUI) en Matlab permiten desarrollar gráficas y modelaciones de ecuaciones diferenciales de una forma mucho más sencilla, esto debido a que el software posee funciones propias que permiten resolver en este caso Ecuaciones Diferenciales y graficarlas de manera sencilla y no es necesario desarrollar la rutina para el método numérico.

- Es importante hacer una evaluación del software que se vaya a realizar en el aula a los estudiantes, ya que estos son que van a utilizar esta herramienta computacional , esto puede mostrar que fallas puede tener el programa en cuanto al diseño y la forma de este, para este trabajo el diseño de la interfaz mostro sus debilidades en cuanto al color de fondo del programa como al tamaño de la fuente, también mostro sus fortalezas en cuanto a la calidad de los gráficos con un 61.9 % de la población afirmo que era muy adecuada, la distribución

de los objetos sacó un 33 % en ese ítem y otro 33 % en adecuada, Ingreso de valores obtuvo un 42 % en la calificación de bastante adecuada y salida de resultados el 52% de los estudiantes afirman que bastante adecuada, es decir cuatro de seis ítems que se evaluaron salieron con una muy buena calificación, Ahora en cuanto a las sugerencias que dieron los usuarios para mejorar el simulador cabe destacar la sugerencia que dio la estudiante Andrea Vargas sobre el color del fondo del uso de colores tierra (café, gris...).

-En cuanto a la implementación del módulo, la primera actividad la contestaron los ocho grupos, comparando el comportamiento de las variables modificadas para los casos sugeridos, en cuanto a la segunda actividad del módulo, el 85 % de los grupos la respondieron el primer punto, de ahí el 52 % dibujó el resonador de una manera aproximada con la información generada con el programa, Ahora en la descripción de los cambios en resonador el 71% de los estudiantes dieron una respuesta aceptable, es decir una respuesta cercana a los cambios del resonador, el 14.28 % se aproximaron bastante a descripción que se vio en la tabla 4.2 . Es decir se cumplió el segundo resultado esperado del módulo pero no de la manera deseada. Siguiendo con el orden de ideas para el segundo punto, el 57.14% de los grupos desarrollaron la actividad, de esa muestra el 25% contestó de manera cercana a lo que se buscaba, mientras que el 50% contestó de manera aceptable, es decir la primera meta del módulo se cumple de manera muy parcial. Y Finalmente el 75 % desarrollo muy bien la última actividad.

-Las simulaciones permiten acercarse a fenómenos que no son muy fáciles de recrear en laboratorio y son una buena herramienta a la hora de enseñar tanto en un curso de ecuaciones diferenciales, como uno de termodinámica o de ondas siempre y cuando vaya acompañado de una parte experimental, esto con el fin que el estudiante pueda materializar el fenómeno físico a estudiar.

Bibliografía

- Cabrero Fraile, F. J., Sánchez Llorente, J. M., Sánchez García, A. B., Borrajo Sánchez, J., Rodríguez Conde, M. J., Cabrero Hernández, M., & Juanes Méndez, J. A. (2010). SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura*, 46-74.
- AAraujo, S. (2012). Modelo de Fuente Sísmica Para El Tremor Volcánico Basado En La Turbulencia Elastica del Magma Andesítico y El lodo Volcánico. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*.
- Armijo, J. (2005). FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES A TRAVÉS DE TUBOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE: ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA GASES IDEALES. *Revista Peruana de Ingeniería Química*, 1-9.
- Atares Huerta, L. (2010). *Fracción másica y fracción molar*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Australian, G. (2 de 4 de 2016). *Applying geoscience to Australia's most important challenges*. Obtenido de <http://www.ga.gov.au/hazards/volcano/>
- Balderas Puga, A. (2011). Didáctica de las Ecuaciones Diferenciales y Tecnología Informática: El Caso de la Modelación. *ASOCIACIÓN MEXICANA DE INVESTIGADORES DEL USO DE LA TECNOLOGÍA EN EDUCACIÓN MATEMÁTICA*, 35-50.
- Bullen, K. E., & Bold, B. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Great Britain: Cambridge University Press.
- Burbano de Ercilla, S., Burbano García, E., & Gracia Muñoz, C. (2005). *Física General*. Madrid: Tebar.
- Cala Vitery, F. (3 de 04 de 2016). *Universidad Jorge Tadeo Lozano*. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Cataldi, Z., Lage j, F., & Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 8-16.
- Cengel, Y., & Boles A, M. (2012). *Termodinámica*. New York: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. Pennsylvania: Mc Graw Hill.
- Chouet, B. (1985). Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. *Journal of Geophysical Research*, 13967-13992.

- Chouet, B., & Kumagai, H. (2000). Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical research*, 25-45.
- Definicion de la Transformada de Fourier. (7 de 6 de 2017). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=-xm6zS8ZXSX>
- Duitama Leal, A. (2013). *Simulacion de la Atenuacion de Frecuencias en Ondas Sismicas Primarias*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Dullius, M. M. (2009). *Enseñanza y Aprendizaje de las Ecuaciones Diferenciales con Abordaje Grafico, Numerico y analitico*. Burgos: Universidad de Burgos.
- Dutrimon, C. (2014). *Étude de faisabilité d'un revêtement élastique pour la furtivité acoustique*. Toulouse: Université de Toulouse .
- Elmo. (29 de 9 de 2016). *Qué es Las TIC en educación*. Obtenido de <http://www.elmoglobal.com/es/html/ict/01.aspx>
- Fazio, M. (2017). *DYNAMIC LABORATORY SIMULATIONS OF FLUID-ROCK COUPLING WITH APPLICATION TO VOLCANO SEISMICITY AND UNREST*. Portsmouth: University of Portsmouth.
- Giancoli, D. (2014). *PHYSICS PRINCIPLES WITH APLICATIONS*. New York: Pearson.
- Gomez, D. M., Torres, R. A., & Narvaez, L. (1996). *Unusual seismic signal associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, From July 1992 to September 1994*. Roma: ANNALI DI GEOFISICA.
- Gomez, D. M., Torres, R. A., Seild, D., Hellweg, M., & Rademacher, H. (1999). *Tornillo seismic events at Galeras Volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements* . Roma: Annali di Geofisica.
- Gonzalez, e. (4 de Noviembre de 2017). *Grupo de Investigación: "Geomorfología Territorio y Paisaje en Regiones Volcánicas"*. Obtenido de Geovol: <https://previa.uclm.es/profesorado/egcardenas/magma.htm>
- Gonzalez, S. (2008). *propriétés acoustique et électriques du grès de Borea*. Quebec: Université du Québec.
- Hazlet, R., & Lockwood, J. (2010). *Volcanoes global perspective*. New York: Wiley-Blackwell.
- Hellweg, M. (1999). Physical Models for the source of Lascar's harmonic Tremor. *Elsevier*, 183-198.
- Hellweg, M., & Seild, D. (2003). *Parameterization of multichromatic tornillo signals observed at Galeras volcano (Colombia)*. Berkeley: Elsevier.
- Hoeger, H. (2007). *Simulacion*. Merida: Universidad de Los Andes.
- Howe, M. S. (1976). ON THE HELMHOLTZ RESONATOR. *Journal of Sound and Vibration*, 427-440.

- Ibañez, J. M., & Carmona, E. (1997). *Sismicidad Volcanica*. Granada: Instituto Andaluz de Geofísica. Instituto Superior de Correlación Geológica CONICET. (14 de 11 de 2016). *Capítulo 4. Volcanismo*. Obtenido de http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/04.htm
- Keller, E. A., & Blodgett, R. H. (2004). *Riesgos Naturales, Procesos de la Tierra Como Riesgos, Desastres y Catastrofes*. Madrid: Pearson.
- Kofman, H. A. (2005). MODELOS Y SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA FÍSICA. *Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral Santiago del Estero 2829, (3000) Santa Fe, República Argentina*.
- Konstantinou, K. I. (2015). *Tornillos modeled as self-oscillations of fluid filling a cavity: Application to the 1992–1993 activity at Galeras volcano, Colombia*. Taiwan: Elsevier.
- Kumagai, H., Chouet, B., & Nakako, M. (2002). Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 1-9.
- Kusky, T. (2008). *Volcano Eruption and Other Volcanic Hazard*. New York: Fact on File.
- Laboratorio de procesamiento de imagen. (21 de 9 de 2016). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de <https://www.lpi.tel.uva.es/>
- Laurents, S., & Tordeux, S. (2012). Lower and upper bounds for the Rayleigh Conductivity of a perforated plate. *Archives Ouvertes*, 1-20.
- Lizaraso Calderon, M. J. (2013). *Relocalización de Sismos Volcano-Tectónicos en el Volcan Galeras a partir de correlación cruzada de forma de onda*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Macías Vázquez, J. L., & Capra, P. L. (2005). *LOS VOLCANES Y SUS AMENAZAS*. México: Fondo de Cultura Económica.
- MADER, H. D., COLES, S. H., CONOR, C. B., & CONOR, L. J. (2006). *STATISTICS IN VOLCANOLOGY*. LONDON: THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON.
- Maricer, M. (2009). Capturando la física de los resonadores Helmholtz. *dialnet*, 1-8.
- Mayorga, E., & Poveda, A. (2013). *ANÁLISIS GRÁFICO Y NUMÉRICO EN LA INTERPRETACIÓN DE UNA SEÑAL SISMOLÓGICA: TEMÁTICAS DE LA FÍSICA DE ONDAS IMPLICADAS EN UN SISMO*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Molina Mora, J. A. (2015). *Experiencia basada en la triada TICS, Enseñanza por proyectos y modelado para las ecuaciones diferenciales*. Costa Rica: Escuela de Matemáticas, Universidad de Costa Rica.
- Montesinos, L. (14 de 11 de 2016). *Teach with blendspace*. Obtenido de <https://www.tes.com/lessons/stiYBtTWqSlf4Q/tema-1-el-sonido>
- Montoya, C. (2010). Utilización de las TICS en la enseñanza de las Ciencias. *II congreso internacional de didáctica* (págs. 1-6). París: Universitat de Girona.

Observatorios sismologicos y vulcanologicos . (14 de Julio de 2016). *Servicio Geologico Colombiano*. Obtenido de <http://www2.sgc.gov.co/Observatorios-Vulcanologicos/Metodologia-para-la-vigilancia-volcanica.asp>

Cabrero Fraile, F. J., Sánchez Llorente , J. M., Sánchez García , A. B., Borrajo Sánchez , J., Rodríguez Conde, M. J., Cabrero Hernández , M., & Juanes Méndez , J. A. (2010). SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura*, 46-74.

AAraujo, S. (2012). Modelo de Fuente Sismica Para El Tremor Volcanico Basado En La Turbulencia Elastica del Magma Andesitico y El lodo Volcanico. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*.

Armijo, J. (2005). FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES A TRAVÉS DE TUBOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE: ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA GASES IDEALES. *Revista Peruana de Ingenieria Quimica*, 1-9.

Atares Huerta, L. (2010). *Fracción másica y fracción molar*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Australian, G. (2 de 4 de 2016). *Applying geoscience to Australia's most important challenges*. Obtenido de <http://www.ga.gov.au/hazards/volcano/>

Balderas Puga, A. (2011). Didáctica de las Ecuaciones Diferenciales y Tecnología Informática: El Caso de la Modelación. *ASOCIACIÓN MEXICANA DE INVESTIGADORES DEL USO DE LA TECNOLOGÍA EN EDUCACIÓN MATEMÁTICA*, 35-50.

Bullen, K. E., & Bold, B. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. Great Britain: Cambridge University Press,.

Burbano de Ercilla, S., Burbano Garcia , E., & Gracia Muñoz, C. (2005). *Fisica General*. Madrid: Tebar.

Cala Vitery, F. (3 de 04 de 2016). *Universidad Jorge Tadeo Lozano*. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>

Cataldi, Z., Lage j, F., & Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 8-16.

Cengel, Y., & Boles A, M. (2012). *Termodinamica*. New York: Mc Graw Hill.

Cengel, Y., & Cimbala, J. M. (2008). *Mecanica de Fluidos*. Pennsylvania: Mc Graw Hill.

Chouet, B. (1985). Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. *Journal of Geophysical Research*, 13967-13992.

Chouet, B., & Kumagai, H. (2000). Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical reseach*, 25-45.

Definición de la Transformada de Fourier. (7 de 6 de 2017). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=-xm6zS8ZXSX>

Duitama Leal, A. (2013). *Simulación de la Atenuación de Frecuencias en Ondas Sísmicas Primarias*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Dullius, M. M. (2009). *Enseñanza y Aprendizaje de las Ecuaciones Diferenciales con Abordaje Gráfico, Numérico y analítico*. Burgos: Universidad de Burgos.

Dutrimon, C. (2014). *Étude de faisabilité d'un revêtement élastique pour la furtivité acoustique*. Toulouse: Université de Toulouse .

Elmo. (29 de 9 de 2016). *Qué es Las TIC en educación*. Obtenido de <http://www.elmoglobal.com/es/html/ict/01.aspx>

Fazio, M. (2017). *DYNAMIC LABORATORY SIMULATIONS OF FLUID-ROCK COUPLING WITH APPLICATION TO VOLCANO SEISMICITY AND UNREST*. Portsmouth: University of Portsmouth.

Giancoli, D. (2014). *PHYSICS PRINCIPLES WITH APLICATIONS*. New York: Pearson.

Gomez, D. M., Torres, R. A., & Narvaez, L. (1996). *Unusual seismic signal associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, From July 1992 to September 1994*. Roma: ANNALI DI GEOFISICA.

Gomez, D. M., Torres, R. A., Seild, D., Hellweg, M., & Rademacher, H. (1999). *Tornillo seismic events at Galeras Volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements* . Roma: Annali di Geofisica.

Gonzalez, e. (4 de Noviembre de 2017). *Grupo de Investigación: "Geomorfología Territorio y Paisaje en Regiones Volcánicas"*. Obtenido de Geovol: <https://previa.uclm.es/profesorado/egcardenas/magma.htm>

Gonzalez, S. (2008). *propriétés acoustique et électriques du grès de Berea*. Quebec: Université du Québec.

Hazlet, R., & Lockwood, J. (2010). *Volcanoes global perspective*. New York: Wiley-Blackwell.

Hellweg, M. (1999). Physical Models for the source of Lascar's harmonic Tremor. *Elsevier*, 183-198.

Hellweg, M., & Seild, D. (2003). *Parameterization of multichromatic tornillo signals observed at Galeras volcano (Colombia)*. Berkeley: Elsevier.

Hoeger, H. (2007). *Simulación*. Merida: Universidad de Los Andes.

Howe, M. S. (1976). ON THE HELMHOLTZ RESONATOR. *Journal of Sound and Vibration*, 427-440.

Ibañez, J. M., & Carmona, E. (1997). *Sismicidad Volcanica*. Granada: Instituto Andaluz de Geofisica.

Instituto Superior de Correlación Geológica CONICET. (14 de 11 de 2016). *Capítulo 4. Volcanismo*. Obtenido de http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/04.htm

- Keller, E. A., & Blodgett, R. H. (2004). *Riesgos Naturales, Procesos de la Tierra Como Riesgos, Desastres y Catastrofes*. Madrid: Pearson.
- Kofman, H. A. (2005). MODELOS Y SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN LA FISICA. *Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral Santiago del Estero 2829, (3000) Santa Fe, República Argentina*.
- Konstantinou, K. I. (2015). *Tornillos modeled as self-oscillations of fluid filling a cavity: Application to the 1992–1993 activity at Galeras volcano, Colombia*. Taiwan: Elsevier.
- Kumagai, H., Chouet, B., & Nakako, M. (2002). Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 1-9.
- Kusky, T. (2008). *Volcano Eruption and Other Volcanic Hazard*. New York: Fact on File.
- Laboratorio de procesamiento de imagen. (21 de 9 de 2016). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de <https://www.lpi.tel.uva.es/>
- Laurents, S., & Tordeux, S. (2012). Lower and upper bounds for the Rayleigh Conductivity of a perforated plate. *Archives Ouvertes*, 1-20.
- Lizaraso Calderon, M. J. (2013). *Relocalizacion de Sismos Volcano-Tectonicos en el Volcan Galeras a partir de correlacion cruzada de forma de onda*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Macias Vazquez, J. L., & Capra, P. L. (2005). *LOS VOLCANES Y SUS AMENAZAS*. Mexico: Fondo de Cultura Economica.
- MADER, H. D., COLES, S. H., CONOR, C. B., & CONOR, L. J. (2006). *STATISTICS IN VOLCANOLOGY*. LONDON: THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON.
- Maricer, M. (2009). Capturando la física de los resonadores Helmholtz. *dialnet*, 1-8.
- Mayorga, E., & Poveda, A. (2013). *ANÁLISIS GRÁFICO Y NUMÉRICO EN LA INTERPRETACIÓN DE UNA SEÑAL SISMOLÓGICA: TEMÁTICAS DE LA FÍSICA DE ONDAS IMPLICADAS EN UN SISMO*. Bogota: Universidad Pedagógica Nacional.
- Molina Mora, J. A. (2015). *Experiencia basada en la triada TICS, Enseñanza por proyectos y modelado para las ecuaciones diferenciales*. Costa Rica: Escuela de Matemáticas, Universidad de Costa Rica.
- Montesinos, L. (14 de 11 de 2016). *Teach with blendspace*. Obtenido de <https://www.tes.com/lessons/stiYBTWqSlf4Q/tema-1-el-sonido>
- Montoya, C. (2010). Utilización de las TICS en la enseñanza de las Ciencias. *II congreso internacional de didactique* (págs. 1-6). Paris: Universitat de Girona.
- Observatorios sismológicos y vulcanológicos. (14 de Julio de 2016). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de <http://www2.sgc.gov.co/Observatorios-Vulcanologicos/Metodologia-para-la-vigilancia-volcanica.aspx>

- Ortegon, M. R. (2002). *Diseño su interfaz grafica con MATLAB*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Perez, G. N. (2014). *Características de Fuentes sísmicas de eventos tipo tornillo en el volcan Purace mediante el analisis de frecuencias complejas*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Ramon, F. (27 de Marzo de 2015). *Ingenieria de Sonido*. Obtenido de <http://www.equaphon-university.net/resonador-de-helmholtz/>
- Rosero Rueda, S. (2016). *ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN Y ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA* . Bogota: Universidad Pedagógica Nacional.
- Sanabria, H. A. (2014). *ESTUDIO DE LA PRECISIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN TUBO DE IMPEDANCIA* . Madrid: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.
- Sanchis, E. (2004). *FUNDAMENTOS Y ELECTRONICA DE LAS COMUNICACIONES*. VALENCIA: UNIVERSITAT DE VALENCIA.
- Sauter, F. (1989). *Introduccion a la Sismologia*. Costa Rica: EDITORIAL TECNOLOGICA DE COSTA RICA.
- Selescnick, L. W. (2011). Resonance Based Signal Descomposition: A new sparsity-enabled Signal Analysis Metods. *Signal Process*, 2793-2809.
- Serway, R., & Beichner, R. (2000). *FISICA PARA LAS CIENCIAS E INGENIERIAS* . Mexico: Mc Graw Hill.
- Tapia, C. (2002). *SISTEMAS, MODELOS Y SIMULACION*. Buenos Aires: Facultad de Ingenieria Universidad de Buenos Aires.
- Tarbuk, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson.
- Tary, J. B., Van der Ban, M., Sutherland, B., & Eaton, D. W. (2014). Characteristics of fluid-induced resonances observed. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-13.
- The Boeing Company. (1968). *Bulk Modulus investigation Hidraulyc Fluid*. Wasington: Comercial Airplane Division.
- Torres, R. A., Gomez, D. M., Ortega E, A. M., & Seidi, D. (2002). *Señales Sísmicas Tornillo*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia .
- Universidad de Almeria. (7 de 6 de 2017). *Teoría de Señales*. Obtenido de <https://w3.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Signals/Theory/index.html>
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (2008). *Fundamentos de Termodinamica*. Mexico: Limusa S.A.
- White, F. M. (1983). *Mecanica de Fluidos*. Mexico: Mac Graw Hill.

Zellmer, G. F., & Annen, C. (2008). *An Introduction to Magma Dynamic*. London: Geological Society, London, Special Publications.

Zobin, V. M. (2003). *INTRODUCTION TO VOLCANIC SEISMOLOGY*. Colima: Elsevier.

Anexo 1

Transformada de Fourier

Sea una señal continua y periódica la cual se puede describir de una manera sencilla a través de una serie de Fourier que está compuesta por funciones senos y cosenos, teniendo en cuenta lo anteriormente dicho esta se representa por medio de la función A 1.1, en donde su derivada sea continua a trozos en un intervalo $[-l, l]$ en tal caso se tiene la siguiente expresión²⁸

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{l}x\right) + b_k \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \quad (\text{A 1.1})$$

Donde

$$a_k = \int_{-l}^l f(t) \cos\left(\frac{k\pi}{l}t\right) dt \quad (\text{A 1.2})$$

$$b_k = \int_{-l}^l f(t) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l}t\right) dt \quad (\text{A 1.3})$$

$$a_0 = \int_{-l}^l f(t) dt \quad (\text{A 1.4})$$

$$k = (0, 1, 2, \dots, n)$$

Ahora para representar funciones que no son de tipo periódicas a partir de la ecuación (A 1.1) la cual se puede expresar por medio de la función de Euler de la forma compleja:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_0 t} \quad (\text{A 1.5})$$

Donde C_n es el coeficiente de Fourier de la serie el cual se representa de la siguiente manera:

²⁸ Para más información sobre las demostraciones de los coeficientes de la serie de Fourier como su transformada puede consultar a (Mayorga & Poveda, 2013)

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) e^{-inw_0 t} dt \quad (\text{A 1.6})$$

Ahora observando la figura A.1.1, si se le asocia una serie exponencial compleja de Fourier como la de la ecuación A 2.5 a la señal $X(t)$ de la figura que está acotada en tiempo en el intervalo $(t_0; t_0 + T)$ no es periódica y se asume que T^{29} tiende al infinito, por tanto la función debe ser continua para todo valor que tome t , para ese caso los límites de integración para los coeficientes de Fourier cambian al valor acotado de la función Por tanto la ecuación A 2.5 toma la forma:

$$X(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-inw_0 t} \right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} g(t) e^{-inw_0 t} dt \right] e^{-inw_0 t} \quad (\text{A 1.7})$$

Retomando si T tiende al infinito y al no ser periódica la función anterior, no tiene una frecuencia fundamental finita por tal motivo no se puede hablar de múltiplos de frecuencias fundamentales finitas por tanto $nw_0 = w$ (A 2.8) donde $w = 2\pi f$; Ahora si se toma el inverso multiplicativo del periodo que por definición se conoce como frecuencia y este es muy pequeño por la afirmación inicial. Se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{T} = df \quad (\text{A 1.9})$$

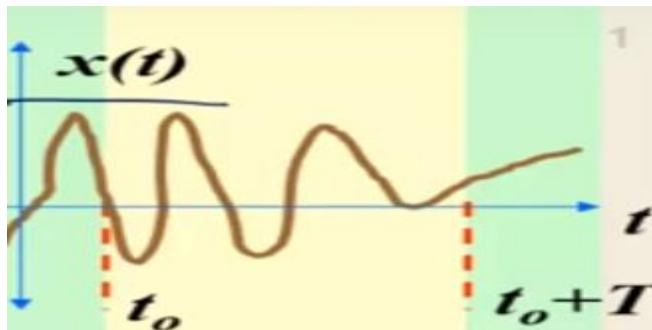


Figura A, 1,0-1 Representación de una señal continua acotada en el intervalo $(t_0; t_0 + T)$ (Definición de la Transformada de Fourier, 2017)

Siguiendo el orden de ideas. Para aproximarse a la señal se deben hacer sumas de tipo infinitesimal, eso trae como consecuencia que los símbolos de sumatoria cambian por el

²⁹ T es el periodo de la señal

símbolo de integral \int dentro de la ecuación (A 2.7), reemplazando (A 2.8) y (A 2.9) en la anterior ecuación se obtiene:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt \right] e^{-i\omega t} d\omega \quad (A 1.10)$$

Ahora si se toma la expresión que se encuentra dentro del paréntesis y se le asigna la función $X(f)$ se obtiene:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (A 1.11)$$

Para la integral que esta fuera del paréntesis cuadrado reemplazando A 1.11 en A 2.10 se obtiene:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{-i2\pi f t} df \quad (A 1.12)$$

La expresión A 2.11 representa la transformada de Fourier en el dominio de frecuencia de la onda, mientras que la última expresión representa la señal en el dominio del tiempo. Esta representación matemática se usa para todo tipo de señal. Cabe recalcar que la expresión anterior es muy similar a la integral de Gauss que representa la distribución normal en probabilidad y estadística.

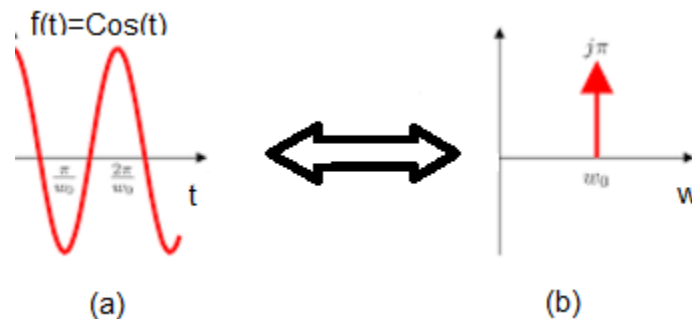


Figura A, 2,0-2 (a) Grafica de la función coseno en el dominio del tiempo, (b) grafica en el dominio de la frecuencia (Universidad de Almería, 2017)

Por ultimo para determinar propiedades de las señales como es la potencia y la energía de la misma se recurre al teorema de Parseval que a continuación se describirá en el próximo anexo.

Anexo 2

Teorema de Parseval y la densidad espectral de potencia

Para definir el teorema de Parseval se tiene lo siguiente, tomando la ecuación A1.1 donde $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ donde f converge uniformemente a f en el intervalo $[0; 2\pi]$, ahora multiplicando $f(x)$ en la ecuación citada anteriormente se obtiene la siguiente expresión:

$$f(x)f(x) = \frac{a_0 f(x)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k f(x) \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k f(x) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \quad (\text{A 2.1})$$

Integrando la siguiente expresión entre $[0; 2\pi]$ se tiene:

$$\int_0^{2\pi} (f(x))^2 dx = \frac{a_0 \int_0^{2\pi} f(x) dx}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \int_0^{2\pi} f(x) \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) dx + b_k \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) dx \quad (\text{A 2.2})$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} (f(x))^2 dx &= \frac{a_0}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) dx \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} a_k \int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) dx + b_k \int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0}{2} + \right. \\ &\left. \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) dx \quad (\text{A 2.3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} (f(x))^2 dx &= \\ &\int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0^2}{4} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \frac{a_0}{2} \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k \frac{a_0}{2} \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) dx + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0 a_k}{2} + \right. \\ &a_k^2 \cos^2\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + a_k b_k \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) dx + \int_0^{2\pi} \left(\frac{a_0 b_k}{2} \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) dx + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} a_k b_k \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \text{sen}\left(\frac{k\pi}{l} x\right) + b_k^2 \text{sen}^2\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \right) dx \quad (\text{A 2.4}) \end{aligned}$$

Integrando y haciendo la sustitución $\text{sen}x\text{cos}x = \frac{\text{sen}2x}{2}$; $\text{cos}^2x = \frac{1+\text{cos}2x}{2}$; $\text{sen}^2x = \frac{1-\text{cos}2x}{2}$ se obtiene:

$$\int_0^{2\pi} (f(x))^2 dx = \frac{\pi^2 a_0^2}{2} + \sum_0^{\infty} \pi^2 a_k^2 + \pi^2 b_k^2 \quad (\text{A } 2.5)$$

Esta expresión se conoce como teorema de Parseval (Sanchis, 2004). el cual define que la potencia de las señales es equivalente a la suma de la potencia de sus componentes espectrales y se toma dependiendo de si la señal es periódica o no, ya que para su análisis se implementa la serie y la transformada de Fourier respectivamente. Ahora para señales de en general el teorema relaciona tanto la expresión del dominio del tiempo como el dominio de la frecuencia y se expresa a través de la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} |X(t)|^2 dt \quad (\text{A } 2.6)$$

Donde la expresión de la derecha corresponde al dominio de la frecuencia del teorema de Parseval y la izquierda corresponde al dominio de la frecuencia, la cual representa la cantidad de energía que gasta la señal, la expresión de la derecha es muy similar a la campana de Gauss, eso quiere decir que la energía que gasta la misma.

Anexo 3

Deducción de la expresión de trabajo para un gas

Teniendo en cuenta la ecuación (2.7), diferenciando y reemplazando en (2.6) se obtienen:

$$PdV + VdP = nRdT \quad (A 3.1)$$

$$PdV = nRdT - VdP \quad (A 3.2)$$

$$dU = -nRdT + VdP \quad (A 3.3)$$

Por la condición de gas ideal $dU = nC_v dT$ donde n es la cantidad de moles del gas, C_v es el calor específico volumétrico del gas³⁰ y $nRdT = -(RP/C_v) dV$ reemplazando en (A 3.2) obtenemos:

$$PdV + VdP = -(RP/C_v) dV \quad (A 3.4)$$

$$P(1 + R/C_v)dV + Vdp = 0 \quad (A 3.5)$$

Sabiendo que $R^{31} = C_p - C_v$; C_p es la capacidad calorífica del gas a presión constante³² y que la constante adiabática se define como $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ donde manipulando algebraicamente y multiplicando $(1/PV)$ en (A 3.5) se obtiene:

³⁰ El calor específico a volumen constante es la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de una masa unitaria de una sustancia a volumen constante

³¹ Ver demostración en (Cengel & Boles A, 2012)

³² El calor específico a presión constante la definición es similar a la anterior pero la masa unitaria de una sustancia se encuentra a presión constante (Cengel & Boles A, 2012)

$$P(1/PV)(C_v + C_p - C_v/C_v)dV + (1/PV)VdP = 0 \quad (A 3.6)$$

Simplificando e integrando (A 3.6) se tiene:

$$\int \gamma \frac{dV}{V} + \int \frac{dP}{P} = Kte \quad (A 3.7)$$

$$\gamma \ln(V) + \ln(P) = kte \quad (A 3.8)$$

$$\ln(P) \ln(V^\gamma) = kte \quad (A 3.9)$$

$$P V^\gamma = kte \quad (A 3.10)$$

$$TV^{\gamma-1} = Kte \quad (A 3.11)$$

Esta última ecuación describe el comportamiento de la temperatura en el gas, luego esta última relación se halla reemplazando el valor de la presión en la ecuación (2.7) en (A 3.1), ahora si se calculara el trabajo realizado por el gas entre los valores de V_2 a V_1 sabiendo que $dW = PdV$, reemplazando el valor de la presión hallado en (A 4.1) teniendo en cuenta la ley adiabática la cual afirma que $PV_1^\gamma = PV_2^\gamma = Kte$ en la ecuación anterior e integrando se obtiene:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{Kte}{V^\gamma} dV \quad (A 4.10)$$

$$W = \frac{PV_1^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}) \quad (A 4.11)$$

Anexo 4

Desarrollo de la simulación

Ahora bien, para desarrollar la simulación se toma el modelo de un tubo, el cual representa un conducto volcánico cilíndrico como se puede apreciar en la figura 1.6 a, Tomando como factor de amortiguación $h = \frac{1}{2Q}$ (Bullen & Bold, 1985), donde Q es el factor de calidad el cual está descrito en la ecuación (2.26), se asume que $F(t) = F_l$ y la masa se representa como $m = \rho SL$, es decir se toma el movimiento amortiguado del sistema, de ahí se resuelve la ecuación diferencial a través del método de Runge Kutta de cuarto-quinto orden a través de la función ODE 45 en matlab, por lo general para que un gas se comporte a condiciones ideales se recurre a que este se encuentra a bajas presiones, pero a partir de las cartas de compresión, los cuales bajo ciertas características de presión y temperatura que se acercan a las condiciones de los volcanes, los gases se aproximan al comportamiento ideal, esos valores se encuentran entre los 5 MPA, 10 MPA, 25 MPA con una temperatura respectiva de 800, 1200 y 1600 Kélvines. Ahora los gases que se van a estudiar en este trabajo son los que más se hallan en los volcanes como son Gas Carbónico CO_2 , Dióxido de Azufre SO_2 y Vapor de agua, las propiedades termodinámicas de estos gases se pueden observar en la tabla 2. Después se van a hacer mezclas con los gases anteriormente nombrados teniendo en cuenta la fracción molar de estas, la cual se define como *el cociente entre las moles de soluto y las moles totales* (Atares Huerta, 2010) y por lo general se representa por la letra ϕ

$$\phi = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{moles totales}} \quad (\text{A.4.1})$$

El modelo que se va a representar consiste en un tubo cilíndrico cerrado por un extremo como el que se puede apreciar en la figura.

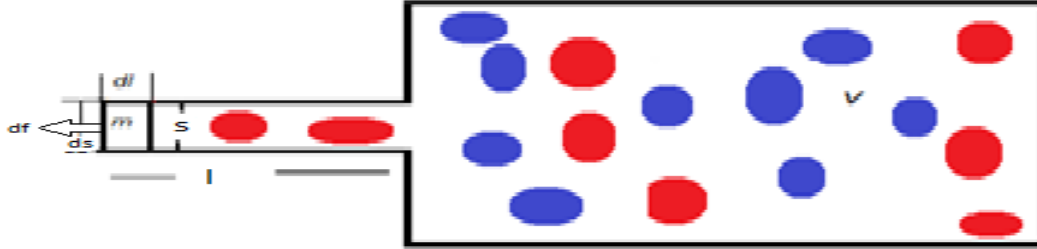


Figura A, 5,1 Esquema del resonador de Helmholtz donde se representa la fuerza que ejerce uno de sus extremos la masa oscilante de gas fuente el autor

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto a continuación para modelar las mezclas se recurre a tener en cuenta que los gases si se modifica la fracción molar de este, así mismo la cantidad de energía que posee este tanto a volumen constante como a presión constante y teniendo en cuenta tanto la relación entre estos como su diferencia (ver capítulo 2), teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y retomando la ecuación (2.14) para realizar las mezclas tenemos.

$$C_{Mezcla} = \sqrt{\gamma_{Mezcla} R_{Mezcla} T} \quad (A.4.2)$$

Donde

$$\gamma_{Mezcla} = \varphi \gamma_{gas} + (1 - \varphi) \gamma_{vapor\ de\ agua} \quad (A.4.3)$$

$$R_{Mezcla} = \varphi R_{gas} + (1 - \varphi) R_{vapor\ de\ agua} \quad (A.4.4)$$

Para calcular la densidad del gas y de las mezclas se tuvo en cuenta la ecuación de gases ideales (2.3) y reemplazando $n = \frac{m}{M}$ se obtiene:

$$PV = nRT = \frac{m}{M} R'T \quad (A.4.5)$$

Donde m es la masa del gas, M es la masa molar del gas, R' es la constante de los gases ideales = $8.314472 \frac{J}{MolK}$ d organizando la expresión anterior teniendo en cuenta que $\rho = \frac{m}{V}$; $R = \frac{R'}{M}$ se consigue:

$$P = \frac{m R'}{V M} T = \rho R T \quad (A.4.6)$$

Donde ρ es la densidad del gas y R es la relación entre la constante de los gases ideales con la masa molar de estos, despejando el valor de ρ se tiene:

$$\rho = \frac{P}{R T} \quad (A.4.7)$$

Para mezclas entre dos gases

$$\rho_{Mezcla} = \frac{P}{R_{Mezclas} T} \quad (A.4.8)$$

Ahora, para la mezcla vapor de Agua -Agua se tiene en cuenta la ecuación para el módulo de elasticidad

$$B_{mezclagas-liquido} = \left(\frac{\varphi}{\gamma p} + \frac{1-\varphi}{B_{agua}} \right)^{-1} \quad (A 4.9)$$

Donde $B_{agua} = 2.2 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$ (White, 1983)

Con referencia a lo anterior, la densidad de la mezcla gas líquido se define como:

$$\rho_{mezclagasliquido} = \rho_{gas} \varphi + (1 - \varphi) \rho_{agua} \quad (A 4.10)$$

Finalmente la ecuación de la velocidad del sonido para las mezclas gas líquido se define por medio de la fórmula de Newton Laplace, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$C_{mezclagasliquido} = \sqrt{\frac{B_{mezclagas-liquido}}{\rho_{mezclagas-liquido}}} \quad (A 4.11)$$

A continuación se retoma la ecuación diferencial (2.20) la cual $w^2 = (2\pi f)^2$ y $\lambda = h = \frac{1}{2Q}$ como se indicó al inicio reemplazando se genera;

$$\frac{F(t)}{m} = \frac{d^2 x}{dt^2} + 2h \frac{dx}{dt} + w^2 x \quad (A 4.12)$$

Retomando que $F(T) = f_l$ y retomando la ecuación (A. 4.12), como el gas se encuentra comprimiéndose se obtiene que:

$$f_l = -F_l = \frac{BS^2 l'}{V} \quad (\text{A 4.13})$$

Donde B es módulo de elasticidad del gas = γP ; para mezclas este se define como $\gamma_{mezcla} P$ Reemplazando (A 5.13), en la E.D (2.20) y despejando $\frac{d^2x}{dt^2}$ se tiene:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{BS^2 l'}{\rho V} - 2h \frac{dx}{dt} - w^2 x \quad (\text{A 4.14})$$

Organizando la ecuación da:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{BS^2}{\rho l'} - 2h \frac{dx}{dt} - w^2 x \quad (\text{A 4.15})$$

Siguiendo con lo anteriormente expuesto se van a tener tres interfaces o Guides en matlab, las cuales se evidenciarán las propiedades del gas cuando se someta este a diversos tamaños de resonadores, así como diversas mezclas que se van a desarrollar con estas, esto con el fin de evidenciar el comportamiento del gas bajo ciertas condiciones y sus variables fundamentales como son la presión y la temperatura de este.

Ahora para comprender de donde viene la frecuencia se tiene recordando la ecuación 2.28:

$$F_l = dpS \quad (\text{A 4.16})$$

Donde S se define como el área transversal del cuello el cual es equivalente a decir que:

$$S = \pi R^2 \quad (\text{A 4.17})$$

En el que R es el radio del resonador, luego se puede señalar que la variación de presión dp se relaciona con la variación de volumen dv a través del módulo de compresibilidad del gas, y estas variaciones de volumen se expresan como:

$$v = \int_0^l \int_0^S ds dl \quad (\text{A 4.18})$$

Al resolver la integral se obtiene:

$$v = Sl' \quad (\text{A 4.19})$$

Luego l^{33} se define como la longitud del cuello, ahora teniendo en cuenta el factor de compresibilidad que se expresó en (2.2)

$$\Delta p = dp = B \frac{\Delta v}{V} = -B \frac{dv}{V} = -B \frac{sl}{V} \quad (\text{A 4.20})$$

Reemplazando en (A 4.16) se obtiene:

$$F_l = -\frac{BS^2l}{V} \quad (\text{A 4.21})$$

Teniendo en cuenta la expresión de Hooke la cual afirma que $F_l = F_x = -Kl$ comparando con (A 4.21) y despejando K se tiene:

$$K = B \frac{S^2}{V} \quad (\text{A 4.22})$$

Luego K representa la constante de elasticidad del resorte, ahora para determinar el valor de la masa m Tomando el diferencial dv en coordenadas cilíndricas para el cuello obtenemos:

$$\int dm = \rho \int_V dv \quad (\text{A 4.23})$$

$$m = \rho \iiint_{0,0,0}^{R,2\pi,l'} r dr d\theta dz \quad (\text{A 4.24})$$

Integrando se obtiene:

$$m = \frac{\rho R^2 2\pi l'}{2} \quad (\text{A 4.24})$$

Simplificando y reemplazando (A 4.19) en (A 4.24) se obtiene:

$$m = \rho S l' \quad (\text{A 4.25})$$

Aplicando la definición de frecuencia para un resorte la cual se define como:

$$\omega = 2\pi f \therefore f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{A 4.26})$$

Reemplazando (A 4.22), (A 4.25) en (A 4.26) y teniendo en cuenta que $C = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$ se obtiene:

$$f = \sqrt{\frac{BS^2}{\rho S l'}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l' V_0}} \quad (\text{A 4.27})$$

³³ La longitud efectiva del tubo es la longitud del tubo el cual es multiplicado por un factor de corrección que está afectado también por el radio del resonador.

Anexo 5

Propiedades termodinámicas de los gases (Chouet & Kumagai, 2000)

H2O Gas	P MPA	Temperatura (kelvin)	Velocidad del Sonido C (m/s)	Capacidad calórica γ	R
	5	800	680	1,25	462
	10	1200	822	1,22	462
	25	1600	941	1,2	462
CO2 gas					
	5	800	417	1,15	189
	10	1200	511	1,15	189
	25	1600	590	1,15	189
SO2 gas	5	800	356	1,22	130
	10	1200	436	1,22	130
	25	1600	500	1,22	130

Anexo 6

Programa en matlab 2014 que simula el sismo sintético a partir del modelo de Helmholtz

```
w0=1.82;
```

```
Q=100;
```

```
%condiciones iniciales
```

```
s = (15/2);
```

```
fr = 0.2;
```

```
T=723;
```

```
p=s*1000000;% Transforma el radio del resonador a micrómetros
```

```
Presion = 5e+6;% Unidades en PA pascales
```

```
RMEZCLA= fr*189+(1-fr)*462;
```

```
a=1.0646;
```

```
moduloBulk =a*Presion;% módulo de Bulk
```

```
densidad = (Presion/(RMEZCLA*T))*(1/1000000); % densidad del so2+ agua a  
20 grados y se transforma a kilogramos/micrómetro cubico
```

```
C = 560*1000000;% Velocidad del sonido y se convierte a micrómetros por  
segundo
```

```
% Presion hidrostática
```

```
A=pi*p*p;% área que se transforma a micrómetros cuadrados
```

```
kr=(2*C)/(Q*w0);% calcula el coeficiente de rayleight
```

```
Lefectiva=(A/kr);% calcula la longitud efectiva en micrómetros
```

```
LT=abs((Lefectiva-p)/1.6);%calcula la longitud del tubo
```

```
V=(C*C*C)/(2*pi*pi*Q*w0*w0*w0);%volumen del resonador en micrómetros  
cubicos
```

```
wl=(C/2*pi)*sqrt(kr/(V));% frecuencia de resonancia
```

```
g=(C*kr*kr)/(8*pi*V);% coeficiente de amortiguación
```

```
x0=zeros(1,2);
```

```
x0(1)=0;% inicio
```

```
x0(2)=0.35*C*0.0001;% velocidad inicial, se multiplica por 0.35 debido a
```

```
%que los tornillos de galeras sus coeficiente de amortiguación se %
```

```
%aproximan a esta medida (Konstantinou)
```

```
% se multiplica el 0.0001 que es el número de match para el caso de flujos  
% compresibles
```

```
tf=1000;
```

```
f=@(t,x) [x(2);(moduloBulk*A*LT)/(V*densidad*Lefectiva)-2*g*x(2)-
```

```
4*pi*pi*wl*wl*x(1)];
```

```
tspan=[0:0.001: tf];
```

```
[t,x]=ode15s(f,tspan,x0);
```

```
plot(t,x(:,1),'r');
```

```
grid on
```

```
ft=cumtrapz(tspan,x(:,2));
```

```
ft=ft-mean(ft);
```

```
figure(2),plot(tspan,ft);
```

Anexo 7
Formulario de Evaluación del Software

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE FISICA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
EVALUACION DE SIMULACION DE GASES

Nombre _____

Marque con una x criterio que mejor se adecue a la apreciación sobre la simulación.

ELEMENTOS	MUY ADECUADO	BASTANTE ADECUADO	ADECUADO	POCO ADECUADO
Tamaño de la fuente				
Fondo del programa				
Ingreso de valores				
Salida de Resultados				
Gráficos del programa				
Distribución de los objetos del programa				

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LA SIMULACION

Anexo 8
Módulo de Implementación



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FISICA
ENSEÑANZA DE LA FISICA Y SU RELACION FISICA MATEMATICA
MODULO DE IMPLEMENTACION
MAURICIO GONZALEZ

Integrantes

- 1 _____
- 2 _____
- 3 _____

Actividad 1



Figura 1. Interfaz gráfica de Usuario que simula el comportamiento de dos gases monofásicos;

Convenciones

1. Pestaña “abrir” ,2. Pestaña “Mostrar Datos”, 3. Pestaña “Ayuda” ,4-12. Ventana grafica donde se dibuja la señal para el gas 1- 25-16. Selector de presiones para el Gas 1 - Gas 2, 6-18. Selector de Temperaturas para Gas 1 -Gas2, 7-19. Selector de Gas para Gas 1 - Gas2, 8-21. Botón que grafica la señal para gas 1; para Gas2, 9-20. Botón que genera resultados como la velocidad del sonido, los cambios en las dimensiones del resonador para gas 1-gas 2, 10-14. Ingreso de la frecuencia para gas 1-gas 2, 11-16. Ingreso de coeficiente de amortiguación gas 1- gas 2, 12-16. Ingreso de radio del resonador para gas 1- gas 2

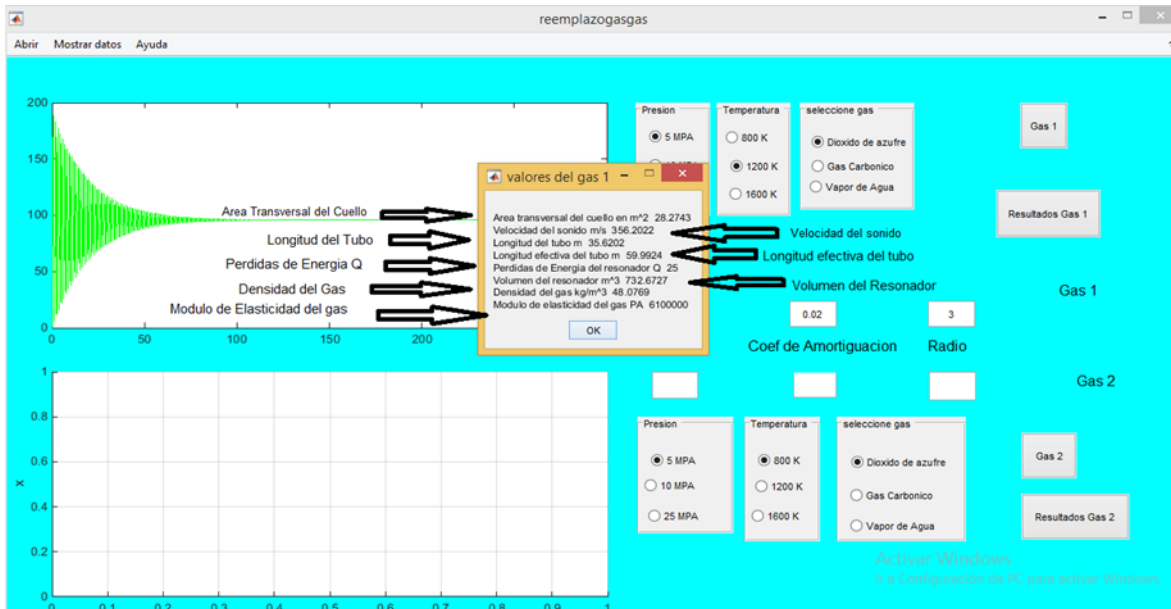


Figura 2, Mensaje generado al oprimir el botón mostrar resultados de gas

1- Considerando la información generada por la simulación, Complete las siguientes tablas, teniendo en cuenta las variables de las tablas “caso” y completando las columnas faltantes con variables diferentes, luego describa en la tabla “propiedades” los cambios de las variables que se enuncian para los dos gases.

Caso 1	Frecuencia Hz	Radio (m)	Presión MPA	Temperatura K	Nombre del gas
Gas 1	5	3	5	1200	Dióxido de Azufre
Gas 2	8	3	5	1200	Dióxido de Azufre

Propiedad	Descripción de cambios
Velocidad del sonido	
Volumen del resonador	

densidad	
Longitud del tubo	
Longitud efectiva del tubo	
Perdidas de energía del resonador	
Descripción de la señal	

Caso 2	Frecuencia Hz	Radio (m)	Presión MPA	Temperatura K	Nombre del gas
Gas 1	5	3	5	1200	Dióxido de Azufre
Gas 2	5	2	5	1200	Dióxido de Azufre

Propiedad	Descripción de cambios
Velocidad del sonido	
Volumen del resonador	
densidad	
Longitud del tubo	
Longitud efectiva del tubo	
Perdidas de energía del resonador	
Descripción de la señal	

Caso 3	Frecuencia Hz	Radio (m)	Presión MPA	Temperatura K	Nombre del gas
Gas 1	5	3	5	1200	Dióxido de Azufre
Gas 2	5	2	5	1600	Dióxido de Azufre

Propiedad	Descripción de cambios
Velocidad del sonido	
Volumen del resonador	
densidad	
Longitud del tubo	
Longitud efectiva del tubo	
Perdidas de energía del resonador	
Descripción de la señal	

Caso 4	Frecuencia Hz	Radio (m)	Presión MPA	Temperatura K	Nombre del gas
Gas 1	5	3	5	1200	Dióxido de Azufre
Gas 2	5	2	5	1600	Vapor de Agua

Propiedad	Descripción de cambios
Velocidad del sonido	
Volumen del resonador	
densidad	
Longitud del tubo	
Longitud efectiva del tubo	
Perdidas de energía del resonador	
Descripción de la señal	

Actividad 2

- 1- Teniendo en cuenta la información descrita en la actividad 1, diligencie la tabla 2.
 - 1 Donde en la primera columna se pide representar gráficamente el resonador para el gas uno, en la siguiente representar gráficamente el resonador para gas 2, ahora, para graficar el resonador, represéntelo gráficamente como se ve en la figura 3. finalmente describir los cambios que se observan al modificar las variables para cada caso



Figura 3. Partes de un resonador (Cocinista, 2017)

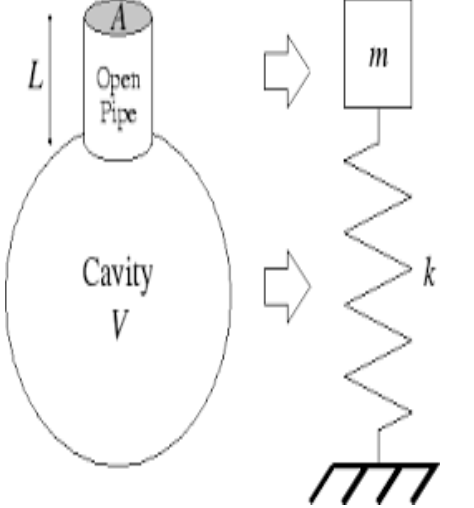
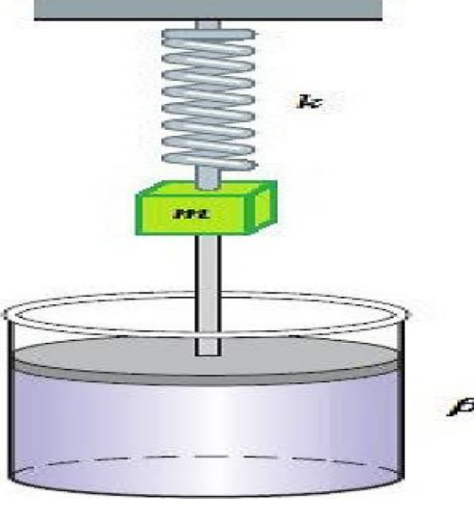
Tabla 2.1

Casos	Representación Gráfica del resonador para gas 1	Representación gráfica para gas 2	Descripción de cambios y conclusiones
Caso 1			
Caso 2			

Caso 3			
Caso 4			

- 2- Teniendo en cuenta la información de la tabla 2.2 complete la tabla 2.3 la cual consiste en representar gráficamente un sistema masa resorte inmerso en un fluido para los resonadores tanto con el gas 1 y el gas 2 y en la última columna describa los cambios del sistema, teniendo en cuenta la información de la actividad 1, donde asume que el volumen del resonador es similar a la fuerza de elasticidad del resorte, también asuman que la densidad del gas es la misma que la densidad del fluido.

Tabla 2.3

Analogías	Resonador de Helmholtz	Sistema masa resorte inmerso en un fluido
GRAFICO		
Ecuación diferencial	$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = \frac{BLS^2}{\rho S l'}$	$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0$
Velocidad angular	$\omega = 2\pi f$ <p>Donde f es la frecuencia ingresada</p>	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$
Coeficiente de amortiguación	$2\lambda = \frac{1}{\text{Perdidas de Energía del resonador}}$	$2\lambda = \frac{b}{m}$
Módulo de elasticidad	B	0
Masa	$m = \rho l' S$ donde	m

	$S = \pi r^2$ r es el radio del resonador <i>ρ es la densidad del gas</i> <i>l' es la longitud efectiva del tubo</i> <i>S es el area transversal del cuello</i>	
Longitud del cuello	l	0

Tabla 2.3

Casos	Sistema masa resorte en un fluido para gas 1	Sistema masa resorte en un fluido para Gas 2	Descripción de cambios y conclusiones
Caso 1			
Caso 2			

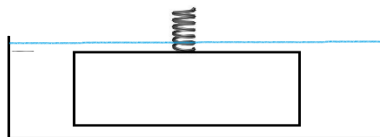
Caso 3			
Caso 4			

Ayuda

Para representar el sistema masa resorte en un fluido para el gas 1, teniendo en cuenta el cálculo de la masa de la tabla 2 se tiene:

$$m = \rho l' S = 32.05 * 72.80 * 28.27 = 65950.69$$

Como la masa es muy grande con respecto al volumen del resonador (74.89 m^3) se puede pensar en una figura de este estilo



Donde la densidad del líquido va a ser la densidad del gas (densidad del dióxido de azufre a $1200 \text{ K} = 32.05 \text{ kg/m}^3$), tengan en cuenta que el tamaño del volumen del resonador les da el tamaño del resorte que van a representar gráficamente, apóyese en la descripciones de la señal realizadas en la actividad 1. Cuando describa la amortiguación del sistema en la tabla 2.3.

Para el sistema masa resorte en un fluido para el gas 2 en el caso 1, teniendo en cuenta la información de la actividad 1 se tiene:

$$m = \rho l' S = 32.05 * 46,62 * 28.27 = 42240,2142$$

Como el volumen del resonador es menor con respecto al resonador del gas 1 para el primer caso según la primera actividad (45.36 m³), y la masa del primer gas del caso uno es mayor que la calculada anteriormente.

3. Escriba la ecuación diferencial del resonador para cada caso en la tabla 2.4, teniendo en cuenta la información de la tabla 2.2

Tabla 2.4

Casos	Ecuación diferencial resonador gas 1	Ecuación Diferencial del resonador gas 2
Caso 1	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$
Caso 2	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$
Caso 3	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$
Caso 4	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$	$\frac{d^2x}{dt^2} + () \frac{dx}{dt} + ()x = ()$


```

    T=1200;
case '1600 K'
    T=1600;
end

blah5= get(handles.uibuttongroup4, 'selectedObject');
hp= get(blah5,'string');
switch hp
    case '5 MPA'
        P= 5e+6;
    case '10 MPA'
        P=10e+6;
    case '25 MPA'
        P=25e+6;
end
blah2= get(handles.uibuttongroup1, 'selectedObject');
hd= get(blah2,'string');
switch hd
    case 'Dioxido de azufre'
        gamma=1.22;
        R=130;
    case 'Gas Carbonico'
        gamma=1.15;
        R=189;
    case 'Vapor de Agua'
        if T==800
            gamma=1.25;
        else
            if T==1200
                gamma=1.22;
            else

```

```

        if T==1600
            gamma=1.2;
        end
    end
end
end
R=462;
end
C=sqrt(gamma*R*T);
LT=0.5*(C/w0);
Lefectiva= 1.6*LT+s;
densidad =P/(R*T) ;
A=pi*s*s;
V=(C*C*A)/(4*pi*pi*w0*w0*Lefectiva);
g=(C*A*A)/(8*pi*V*Lefectiva*Lefectiva);
if g<=0 || g>=1
    msgbox('Los valores del coeficiente de amortiguacion se encuentran entre 0 y 1, por favor ingrese de nuevo
    el valor ','mensaje');
else
    x0=zeros(1,2);
    x0(1)=0;
    x0(2)=1;
    tf=300;
    f=@(t,x) [x(2);((gamma*P)*A*LT)/(densidad*Lefectiva*V)-2*g*x(2)-4*pi*pi*w0*w0*x(1)];
    tspan=[0 tf];
    [t,x]=ode45(f,tspan,x0);
    plot(handles.axes1,t,x(:,1),'g');
    grid on;
    xlabel('t');
    ylabel('x');
    end
    end
end

```

```

end
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
w=get(handles.edit4,'string');
s1=get(handles.edit6,'string');
if isempty(w)||isempty(s1)
    msgbox('Por favor ingrese frecuencia y radio del resonador','mensaje');
else
    w0=str2double(w);
    s=str2double(s1);
if w0<0|| w0>=20
    msgbox('Por favor ingrese valores mayores de cero y menores de 20 Hz ','mensaje')
else
    if s<0
        msgbox('Por favor ingrese valores mayores de cero en el radio','mensaje')
    else
        blah=get(handles.uibuttongroup10,'selectedObject');
h=get(blah,'string');
switch h
    case '800 K'
        T=800;
    case '1200 K'
        T=1200;
    case '1600 K'
        T=1600;
end
blah5= get(handles.uibuttongroup9, 'selectedObject');
hp= get(blah5,'string');
switch hp
    case '5 MPA'
        P= 5e+6;
    case '10 MPA'

```

```

    P=10e+6;
    case '25 MPA'
        P=25e+6;
    end
    blah2= get(handles.uibuttongroup8, 'selectedObject');
    hd= get(blah2,'string');
    switch hd
        case 'Dioxido de azufre'
            gamma=1.22;
            R=130;
        case 'Gas Carbonico'
            gamma=1.15;
            R=189;
        case 'Vapor de Agua'
            if T==800
                gamma=1.25;
            else
                if T==1200
                    gamma=1.22;
                else
                    if T==1600
                        gamma=1.2;
                    end
                end
            end
            R=462;
        end
    C=sqrt(gamma*R*T);
    LT=0.5*(C/w0);
    Lefectiva= 1.6*LT+s;
    densidad =P/(R*T) ;

```

```

A=pi*s*s;
V=(C*C*A)/(4*pi*pi*w0*w0*Lefectiva);
g=(C*A*A)/(8*pi*V*Lefectiva*Lefectiva);
if g<=0 || g>=1
    msgbox('Los valores del coeficiente de amortiguacion se encuentran entre 0 y 1, por favor ingrese de nuevo el valor ','mensaje');
else
x0=zeros(1,2);
x0(1)=0;
x0(2)=1;
tf=300;
f=@(t,x) [x(2);((gamma*P)*A*LT)/(densidad*Lefectiva*V)-2*g*x(2)-4*pi*pi*w0*w0*x(1)];
tspan=[0 tf];
[t,x]=ode45(f,tspan,x0);
plot(handles.axes2,t,x(:,1),'r');
grid on;
xlabel('t');
ylabel('x');
end
end
end
end
end

```

Para las mezclas se tiene

```

w=get(handles.edit1,'string');

s1=get(handles.edit3,'string');
fr=(get(handles.edit8,'string'));

if isempty(w)||isempty(s1)||isempty(fr)
    msgbox('por favor ingrese frecuencia,radio del resonador y fraccion molar para la mezcla 1','mensaje');
else
w0=str2double(w);

```



```

s=str2double(s1);
fraccion=str2double(fr);
if w0<0 || w0>=21
    msgbox('Por favor ingrese valores mayores de cero y menores de 20 Hz para la frecuencia','mensaje')
else

if s<0
    msgbox('Por favor ingrese valores mayores de cero para el radio para mezcla 1','mensaje')
else
    if fraccion <=0 || fraccion>=1
        msgbox('los valores de fraccion molar se encuentran entre cero y uno, por favor ingrese de nuevo el valor para mezcla 1','mensaje')
    else

blah4=get(handles.uibuttongroup4,'selectedObject');
h=get(blah4,'string');
switch h
    case '800 Kelvin'
        T=800;
        Va=1.25;
    case '1200 Kelvin'
        T=1200;
        Va=1.22;
    case '1600 Kelvin'
        T=1600;
        Va=1.2;
end

blah5= get(handles.uibuttongroup3, 'selectedObject');
hp= get(blah5,'string');

```

```

switch hp
  case '5 MPA'
    P= 5e+6;
  case '10 MPA'
    P=10e+6;
  case '25 MPA'
    P=25e+6;
end

```

```

blah6= get(handles.uibuttongroup5, 'selectedObject');
hd= get(blah6,'string');

```

```

switch hd
  case 'Gas Carbonico-Vapor '
    gammezcla=(fraccion*1.15)+((1-fraccion)*Va);
    Rmezcla=(130*fraccion)+((1-fraccion)*462);
    Dmezcla=P/(Rmezcla*T);
    B=gammezcla*P;
    C=sqrt(gammezcla*Rmezcla*T);

```

```

  case 'Dioxido de Azufre -Vapor de Agua'
    gammezcla=fraccion*1.22+(1-fraccion)*Va;
    Rmezcla=189*fraccion+(1-fraccion)*462;
    Dmezcla=P/(Rmezcla*T);
    B=gammezcla*P;
    C=sqrt(gammezcla*Rmezcla*T);

```

```

  case 'Vapor de Agua-Agua'
    alfa= fraccion/(Va*P);
    beta= (1-fraccion)/(2.2e+9);

```

```

B=1/(alfa+beta);
Dvapor=P/(462*T);
Dmezcla=fraccion*Dvapor+(1-fraccion)*1000;
C=sqrt(B/Dmezcla);

end

A=pi*s*s;
LT=0.5*(C/w0);
Lefectiva=1.6*LT+s;

V= C*C*A/(4*pi*pi*w0*w0*Lefectiva);
g=C*A*A/(8*pi*V*Lefectiva*Lefectiva);
if g<=0 || g>=1
    msgbox('Los valores del coeficiente de amortiguacion se encuentran entre 0 y 1, por favor ingrese de nuevo el valor ','mensaje');
else
    x0=zeros(1,2);
    x0(1)=0;
    x0(2)=1;
    tf=300;
    f=@(t,x) [x(2);(B*A*A*LT)/(Dmezcla*Lefectiva*A*V)-2*g*x(2)-w0*w0*x(1)];
    tspan=[0 tf];
    [t,x]=ode45(f,tspan,x0);
    plot(handles.axes1,t,x(:,1),'b');
    grid on;

    xlabel('t');

```

```
ylabel('x');
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```