

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Estudio de las propiedades de propagación de los ultrasonidos en un medio viscoso”

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**Juan-Senabre Pérez, Javier**

Tutor/a:

**Martínez Mora, Juan Antonio  
Pérez Arjona, Isabel**

**GANDIA, 2013**

## Resumen

El presente ejercicio tiene como finalidad el estudio del comportamiento de medios con diferente viscosidad al paso de los ultrasonidos por medio de la técnica eco-impulso.

En concreto se estudia el comportamiento de mezclas de agua y glicerina, con diferentes concentraciones de glicerina y a diferentes temperaturas, con objeto de obtener un modelo de predicción de dicho comportamiento que ayude a establecer las características idóneas del medio (velocidad de propagación del sonido), para el estudio de fenómenos no lineales en resonadores acústicos.

El objetivo es encontrar un fluido en el que la temperatura del mismo no altere la velocidad de propagación y por tanto la distribución modal de la cavidad del resonador, lo que permitirá estudiar la dinámica espaciotemporal de un medio viscoso en presencia de un campo ultrasónico intenso, así como el estudio de los mecanismos de formación de patrones espaciotemporales, sin que éstos se vean afectados por el incremento de temperatura que el resonador ultrasónico (interferómetro) provoca en la cavidad. Así mismo los resultados de este estudio contribuirán al análisis de la variación de la desintonía del sistema producida por el aumento local de temperatura inducido por el campo ultrasónico.

## Abstract

This exercise aims to study the behaviour of environments with different viscosity through ultrasounds using the eco-boost technology.

It specifically studies the behaviour of water and glycerol mixtures, with different concentrations of glycerin and at different temperatures in order to obtain a prediction model of that behaviour and help to establish the ideal characteristics of the environment (speed of sound propagation), for the study of nonlinear phenomena in acoustic resonators.

The objective is to find a fluid wherein its temperature does not alter the velocity of propagation and therefore the modal distribution of the resonator cavity, allowing the study of spatiotemporal dynamic of a viscous environment in the presence of an intense ultrasonic field and the study of the formation mechanisms of spatiotemporal patterns, without them being affected by the temperature rise that the ultrasonic resonator (interferometer) leads into the cavity. Likewise, the results of this study will contribute to the analysis of the detuning variation in the resonator system produced by the local temperature rise induced by the ultrasound field.

## Índice

1. Introducción
2. Principios básicos de los Ultrasonidos
  - 2.1. Introducción
  - 2.2. Principales parámetros de los ultrasonidos
    - 2.2.1. Amplitud, frecuencia, periodo y longitud de onda
    - 2.2.2. Sensibilidad y resolución de un transductor
    - 2.2.3. Forma de onda y espectro
  - 2.3. Propagación de los ultrasonidos en medios homogéneos: definiciones y fórmulas
    - 2.3.1. Interfaz acústica: impedancia acústica, reflectividad y atenuación
    - 2.3.2. Campo acústico
  - 2.4. Generación de ultrasonidos
  - 2.5. Aplicaciones de los ultrasonidos
  - 2.6. El resonador ultrasónico (interferómetro)
3. Parámetros del medio
  - 3.1. Propiedades fundamentales de los líquidos
  - 3.2. Conceptos
    - 3.2.1. Densidad de un fluido
    - 3.2.2. Presión atmosférica, relativa y absoluta
    - 3.2.3. Compresibilidad de un líquido
    - 3.2.4. Viscosidad
    - 3.2.5. Agua
    - 3.2.6. Glicerina
4. Procedimiento experimental
  - 4.1. Material e instrumental empleado
  - 4.2. Cálculo del coeficiente de reflexión de la interfaz solución-recipiente
  - 4.3. Proceso de registro de medidas
5. Resultados obtenidos
  - 5.1. Errores accidentales en medidas directas
  - 5.2. Determinación de la incertidumbre absoluta de una medida indirecta
  - 5.3. Curvas de velocidad de propagación
  - 5.4. Conclusiones

## Bibliografía

Anexo I: Especificaciones técnicas del equipamiento utilizado

Anexo II: Detalle de los resultados obtenidos

Anexo III: Detalles de los resultados obtenidos (gráficas)

## 1. Introducción

El presente ejercicio tiene como finalidad el estudio del comportamiento de medios con diferente viscosidad al paso de los ultrasonidos por medio de la técnica eco-impulso.

En concreto se estudia el comportamiento de mezclas de agua y glicerina, con diferentes concentraciones de glicerina y a diferentes temperaturas, con objeto de obtener un modelo de predicción de dicho comportamiento que ayude a establecer las características idóneas del medio (velocidad de propagación del sonido), para el estudio de fenómenos no lineales en resonadores acústicos. La línea de estudio sobre la dinámica espacio-temporal de los resonadores acústicos tiene una larga tradición dentro del Grupo de Acústica del Campus de Gandía y son varios los trabajos de investigación realizados en torno a este tema, tanto desde el punto de vista teórico como experimental.

El estudio de la dinámica los resonadores se ha llevado a cabo tanto desde el punto de vista temporal como espaciotemporal. Cuando se consideran las dimensiones espaciales del sistema, los modelos predicen la existencia de patrones espaciotemporales que surgen espontáneamente en el plano transversal del resonador. La existencia de patrones espaciales es un fenómeno universal que comparten disciplinas como la química, la biología, la mecánica de fluidos o la óptica no lineal. Sin embargo, estos patrones no se han observado en acústica, y los resonadores podrían ser unos buenos candidatos para ello. En estos sistemas, en los que el ultrasonido se autoorganiza espacialmente, se puede aprovechar la localización de este haz ultrasónico para otros usos, como pueden ser industriales o médicos. El comportamiento de los resonadores se ha estudiado bien, para el caso en que la no linealidad que rige la dinámica del medio es elástica (por ejemplo el agua) o bien térmica (fluidos viscosos, por ejemplo la glicerina), dando lugar a la predicción de distintas estructuras espaciotemporales en cada caso. Si bien el comportamiento experimental cualitativo se adecua a las predicciones teóricas, el comportamiento cuantitativo tiene una difícil repetibilidad, lo que dificulta la observación de algunos fenómenos, como los patrones espaciales.

Hasta la fecha hay publicados estudios sobre la no linealidad de tipo elástica en el agua, donde ocurren una serie de fenómenos, así como la no linealidad térmica en glicerina pura, donde debido al campo ultrasónico, aumenta significativamente la temperatura del fluido variando la velocidad del sonido y por tanto los patrones espaciotemporales. Esto es debido a que los dos parámetros que gobiernan el sistema son, fundamentalmente, la presión inyectada y la desintonía, es decir, la distancia entre la frecuencia inyectada y la frecuencia más cercana de la cavidad. Dado que el ultrasonido atraviesa el fluido, éste se calienta lo que varía la velocidad de propagación del sonido en el fluido y por tanto la distribución de modos propios. Esto implica una variación de la desintonía inevitable por el hecho de tener el sistema en funcionamiento, lo que dificulta la observación de los fenómenos predichos.

Encontrar un fluido en el que la temperatura del mismo no altere la velocidad de propagación y por tanto la distribución modal de la cavidad, permitirá estudiar la dinámica espaciotemporal de un medio viscoso en presencia de un campo ultrasónico intenso, así como el estudio de los mecanismos de formación de patrones espaciotemporales, sin que éstos se vean afectados por el incremento de temperatura que el resonador ultrasónico (interferómetro) provoca en la cavidad. Así mismo los resultados de este estudio contribuirán al análisis de la variación de la desintonía del sistema producida por el aumento local de temperatura inducido por el campo ultrasónico.

## 2. Principios básicos de los Ultrasonidos

### 2.1. Introducción

Se denomina ultrasonido a todo sonido generado por encima del rango de audición humana (entre 20 Hz y 20 kHz). Su aplicación se extiende a los ensayos no destructivos de materiales y en diagnóstico médica, debido a que la gama de frecuencias utilizada en estos estudios (normalmente entre 100 kHz y 50 MHz) produce una longitud de onda muy corta, hecho que permite la reflexión en superficies muy pequeñas con la ventaja de detectar defectos dentro de materiales.

El espectro acústico en la figura 1 se descompone en tres rangos de sonido de frecuencias. El rango ultrasónico se desglosa aún más en tres subsecciones: baja frecuencia, frecuencia de uso habitual y alta frecuencia.

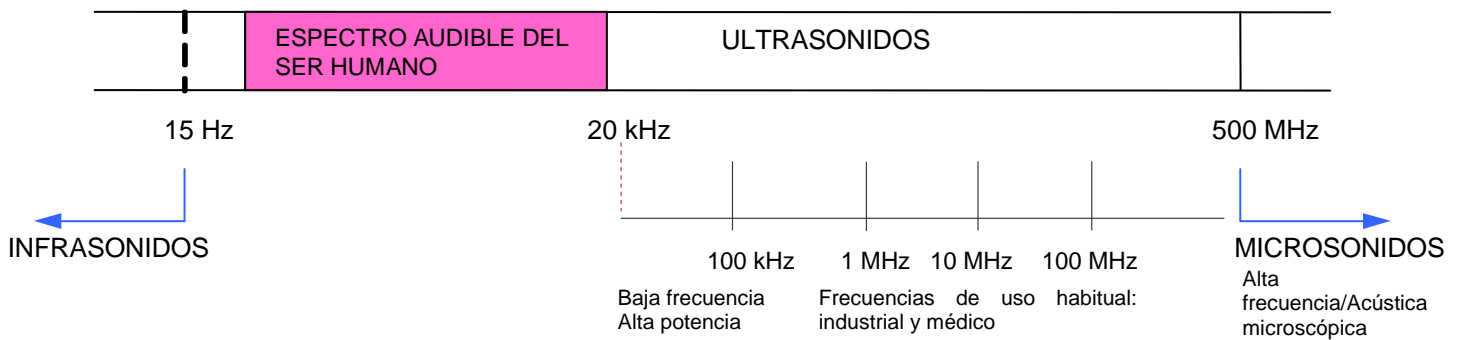


Figura 1: Espectro acústico

### 2.2. Principales parámetros de los ultrasonidos

#### 2.2.1. Amplitud, frecuencia, periodo y longitud de onda

Las vibraciones ultrasónicas viajan en forma de ondas similar a la forma de propagación de la luz. Sin embargo, a diferencia de la luz, que puede viajar en el vacío (en ausencia de medio material), el ultrasonido requiere un medio elástico tal como un líquido o un sólido. La figura 2 muestra los parámetros básicos de una onda continua. Estos parámetros incluyen la longitud de onda ( $\lambda$ ), el período (T) de un ciclo completo y la frecuencia (f).

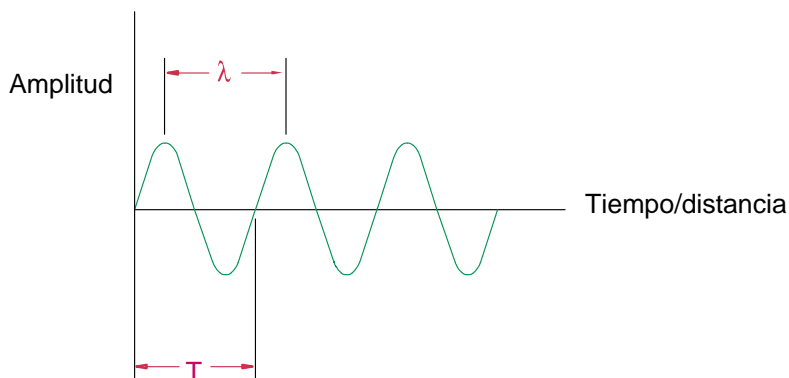


Figura 2: Forma de onda



La figura 4 muestra la frecuencia de pico, las frecuencias superior e inferior -6 dB y el ancho de banda MHz.

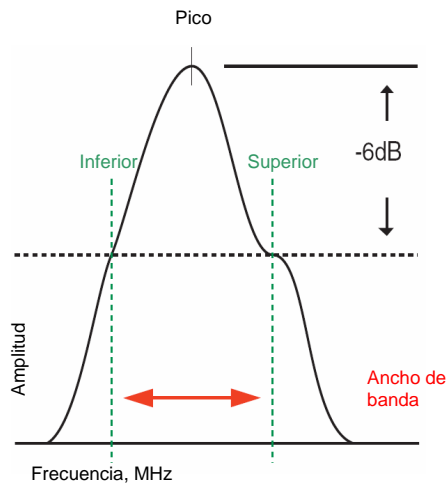


Figura 4: Ancho de banda

## 2.3. Propagación de los ultrasonidos en medios homogéneos: definiciones y fórmulas

### 2.3.1. Interfaz acústica: impedancia acústica, reflectividad y atenuación

Ciertas características de los fluidos y de los sólidos influyen en la onda de sonido. Es por eso que el sonido se propaga en los sólidos y en los líquidos con mayor rapidez que en los gases.

Las perturbaciones sonoras que se producen en un punto de un medio elástico, se propagan a través de él con una velocidad  $c$ , que depende de la densidad  $\rho$  y el coeficiente de compresibilidad del medio  $k$  de acuerdo con la ecuación (2):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot k}} \quad (2)$$

De modo que materiales con menor densidad y menor coeficiente de compresibilidad transmitirían el sonido a una velocidad mayor.

Cuando una onda ultrasónica atraviesa un material aparecen una serie de fenómenos; entre ellos, la reflexión de los haces ultrasónicos hacia el transductor, denominado eco. Una reflexión ocurre en el límite o interfase entre dos materiales y pone de manifiesto de que un material es diferente a otro. Esta propiedad es conocida como impedancia acústica específica  $Z$  y es el resultado del producto de la densidad y velocidad de propagación, ecuación (3).

$$Z = \rho \cdot c \quad (3)$$

El contacto de dos materiales con diferente impedancia acústica da lugar a una interfaz entre ellos. Si la diferencia en la impedancia acústica es pequeña se producirá un eco débil; por otro lado si la diferencia es amplia, se producirá un eco fuerte y si es muy grande se reflejará la mayor parte del haz ultrasónico, tal y como puede visualizarse en la figura 5.

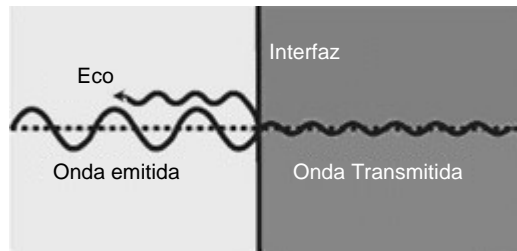


Figura 5: Interfaz acústica

Como resultado de la perturbación, la presión varía con respecto a un valor medio y la diferencia entre el valor instantáneo y el valor medio se denomina presión acústica P.

La intensidad acústica I de la onda es la energía acústica por segundo que atraviesa un área unidad perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Sus unidades se expresan en W/m<sup>2</sup>.

La impedancia acústica específica Z, la presión acústica P y la intensidad acústica I están relacionadas mediante la ecuación (4):

$$I = \frac{P^2}{Z} = \frac{P^2}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

Al propagarse la radiación en un medio homogéneo, su intensidad acústica sufre una atenuación exponencial de acuerdo con la ecuación (5):

$$I = I_0 \cdot e^{-2\alpha x} \quad (5)$$

Siendo  $I_0$  la intensidad acústica incidente  
 $\alpha$  el coeficiente de atenuación (en presión)  
 $x$  la distancia recorrida

Cuando el sonido choca contra una interfaz acústica con incidencia normal, o lo que es lo mismo, el sonido pasa de un medio de impedancia acústica  $Z_1$  a otro de impedancia acústica  $Z_2$ , una cierta cantidad de la energía del sonido, además de ser absorbida, se refleja y una cierta cantidad se transmite a través del límite, figura 6. En este caso los coeficientes de reflexión y transmisión de intensidad son los mostrados en las ecuaciones (6), (7) y (8):

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (6)$$

$$T_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (7)$$

$$R_I + T_I = 1 \quad (8)$$



Donde  $I_i$  es la intensidad acústica de radiación incidente  
 $I_r$  es la intensidad acústica de radiación reflejada  
 $I_t$  es la intensidad acústica de radiación transmitida

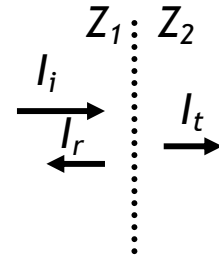


Figura 6: Reflexión y transmisión en una interfaz

La pérdida de energía, expresada en dB, en la transmisión de una señal a partir del medio 1, con impedancia acústica  $Z_1$ , al medio 2, con impedancia acústica  $Z_2$ , viene dada por la ecuación (9):

$$TL(\text{transmission loss, dB}) = 10 \log \left[ 4Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2 \right] \quad (9)$$

La pérdida de energía, expresada en dB, de la señal de eco en el medio 1,  $Z_1$ , que se refleja en el límite de la interfaz con el medio 2,  $Z_2$ , está dada por la ecuación (10):

$$TL(\text{transmission loss, dB}) = 10 \log \left[ (Z_2 - Z_1)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \right] \quad (10)$$

### 2.3.2. Campo acústico

La mayoría de los transductores diseñado para uso médico están enfocados y cada fabricante identifica la distancia focal de los transductores. Existen, básicamente, dos maneras de focalizar el haz:

- Con la forma del cristal, se controla el foco del haz ultrasónico.
- Con lentes acústicas ubicadas en cualquier punto del haz, aunque éstas suelen venir incorporadas al transductor. Pueden fabricarse de poliestireno, nylon, otros materiales plásticos y aluminio.

Según el principio de Huygens, la superficie del transductor se considera como un conjunto de elementos separados cada uno irradiando ondas hemisféricas hacia adelante. Los elementos se mueven sincrónicamente y con amplitudes iguales. Consecuentemente, el campo de ultrasonidos producido por un conjunto lineal de elementos, se concentra en un haz que se hace más uniforme según se aumente la distancia al transductor. El haz es la región en la que las ondas están en fase.

Si el haz emitido no dispone de focalización, éste diverge gradualmente según atraviesa los diferentes materiales, lo cual conduce a una pobre resolución espacial. El perfil del haz puede ser modificado mediante técnicas de enfoque. El enfoque reduce las dimensiones laterales del haz dentro de la zona de foco y por lo tanto mejora la resolución en profundidad y elevación. El fenómeno de enfoque ocurre en el punto del campo donde llegan simultáneamente todas las contribuciones de la superficie del transductor, esto es, en fase.

El campo acústico de un transductor se divide en dos zonas (figura 7): el campo próximo y el campo lejano. El campo próximo es la región que se encuentra cerca del transductor (entre el transductor y el campo lejano), donde la amplitud del eco pasa a través de una serie de máximos y mínimos terminando, en el último máximo, a una distancia  $N$  del transductor. En el campo sonoro próximo a una fuente de sonido el nivel de presión sonora instantánea y la velocidad de las partículas no están en fase. El campo próximo, también denominado campo cercano o zona Fresnel, se caracteriza por un haz altamente colimado con gran variación de intensidad entre un frente de onda y el siguiente.

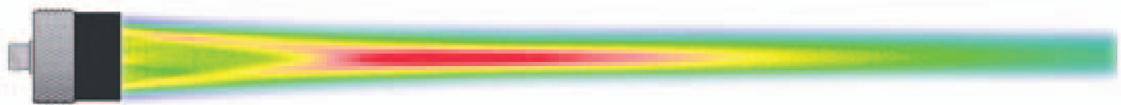


Figura 7: Campo próximo y campo lejano

En el perfil del haz (figura 8), la zona de color rojo representa áreas con energía más alta, mientras que las zonas de color verde y azul representan las áreas con energía más baja.

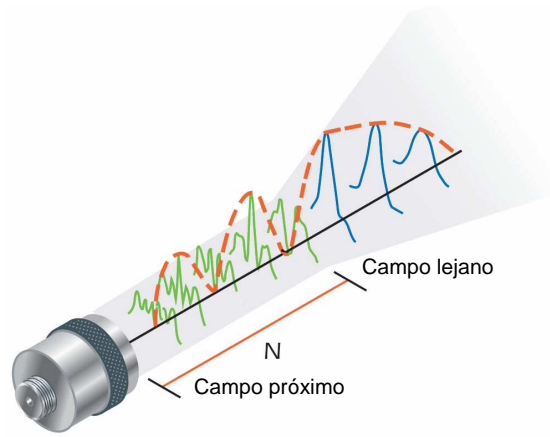


Figura 8: Contenido energético del haz en campo próximo y campo lejano

La ubicación del último máximo se conoce como la distancia de campo cercano (N) y es el enfoque natural del transductor. El campo lejano es el área más allá de N, donde la presión del campo de sonido cae gradualmente a cero. Es la porción del campo sonoro de una fuente de sonido en que el nivel de presión sonora (debido a esta fuente) desciende en 6 dB por cada duplicación de la distancia desde la fuente. El campo lejano, también denominado campo distal o zona Fraunhofer, se caracteriza por la divergencia del haz y por una intensidad más uniforme entre frentes de ondas.

La distancia de campo próximo es función de la frecuencia del transductor, del diámetro del elemento y de la velocidad del sonido del material de ensayo tal como se muestra en la siguiente ecuación (11):

$$N = D^2 f / 4c = D^2 / 4\lambda \quad (11)$$

Siendo N la distancia de campo próximo  
 D el diámetro del elemento  
 f la frecuencia del sonido  
 c la velocidad del sonido en el material  
 $\lambda$  la longitud de la onda

Además del campo cercano hay otros parámetros que describen las características de un transductor como son el conocimiento de la anchura del haz y la zona focal. Pueden ser necesarios a fin de determinar si un transductor en particular es apropiado para una inspección dada. La Figura 9 proporciona una representación gráfica de estos parámetros:

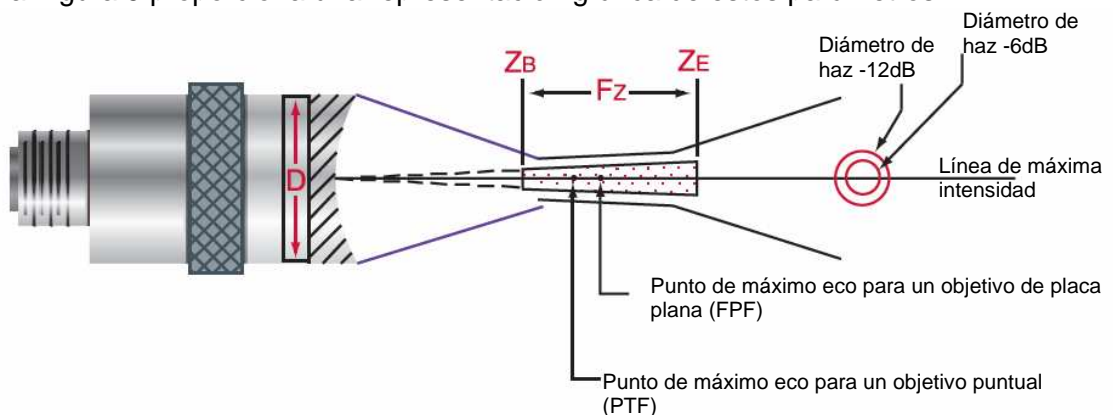


Figura 9: Principales parámetros de un transductor

Siendo Z<sub>B</sub> el comienzo de la zona focal  
 Z<sub>E</sub> el final de la zona focal  
 F<sub>Z</sub> la zona focal  
 D el diámetro del elemento

La sensibilidad de un transductor se ve afectada por el diámetro del haz en el punto de interés. Cuanto más pequeño es el diámetro del haz, mayor es la cantidad de energía que es reflejada por un reflector (defecto). El diámetro del haz -6 dB pulso-eco en el foco, para un transductor plano, se puede calcular con la ecuación (12):

$$\text{DiámetroHaz} (-6\text{dB}) = 0.2568D \cdot S_F \quad (12)$$

Siendo  $F$  la longitud focal  
 $D$  el diámetro del elemento  
 $S_F$  es la longitud focal normalizado y viene dada por la ecuación (13):

$$S_F = F/N \quad (13)$$

Para un transductor plano se considera  $S_F = 1$ .

La apertura de haz y el ángulo medio son, junto a lo anteriormente expuesto, parámetros necesarios para caracterizar un transductor. Todos los transductores tienen dispersión del haz. La Figura 10 da una vista simplificada de un haz de sonido para un transductor plano. En el campo cercano, el haz tiene una forma compleja que se estrecha. En el campo lejano el haz diverge.

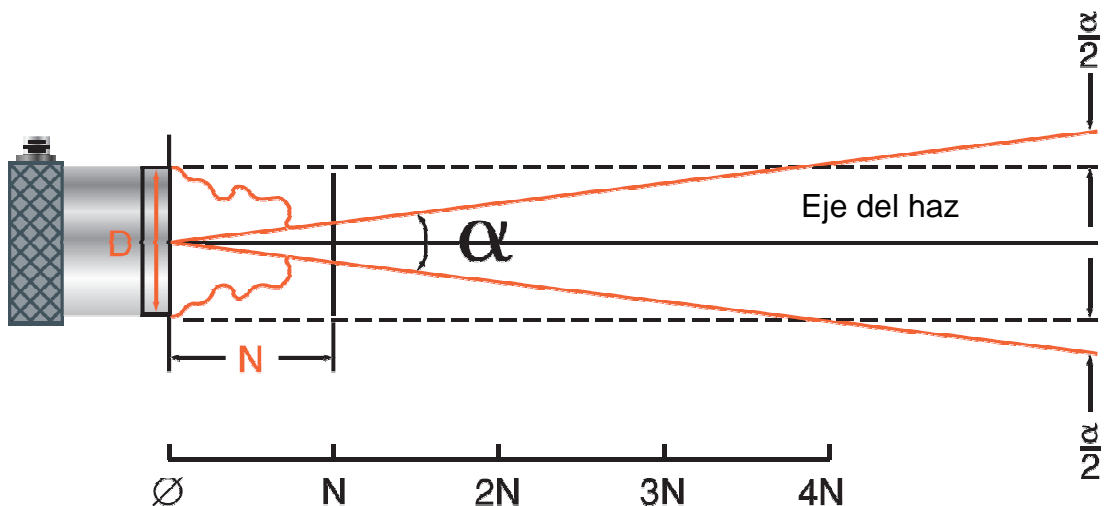


Figura 10: Apertura de haz y ángulo medio

Para transductores planos, como el mostrado en la figura 10, el ángulo de dispersión del haz de pulso-eco (- 6 dB) está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{sen}(\alpha/2) = 0.514 \cdot \frac{c}{f \cdot D} \quad (14)$$

Siendo  $\alpha/2$  la mitad del ángulo de separación entre puntos de -6 dB.

Observando las ecuaciones anteriores, pueden enunciarse las siguientes relaciones:

- Al aumentar el diámetro del transductor y/o la frecuencia del ultrasonido, el campo próximo se alarga y disminuye la divergencia del campo lejano.
- Actuando sobre frecuencia y/o el diámetro del transductor se puede reducir el diámetro del haz propagado, obteniendo como resultado una mayor cantidad de energía reflejada en el reflector y una menor contribución de las reflexiones de las paredes del recipiente contenedor del fluido bajo estudio.

#### 2.4. Generación de ultrasonidos

Para generar ultrasonidos se utilizan habitualmente materiales piezoeléctricos en los que se generan tensiones eléctricas al aplicarles una presión mecánica. El efecto piezoeléctrico se debe a que la presión provoca una deformación de la red cristalina que da lugar, a su vez, a un desplazamiento de las cargas eléctricas moleculares, lo que hace que aparezcan diferencias de potencial entre las caras del material. El signo de esta diferencia de potencial se invierte cuando se invierte el sentido de la presión, que puede ser de tracción o de compresión.

El cuarzo y la turmalina son materiales piezoeléctricos naturales, pero debido al valor reducido de sus parámetros característicos, fueron sustituidos por otros materiales piezoeléctricos sintéticos implementados con titanatos y circonatos de plomo (PZT). Estos materiales son más estables que los naturales, aunque presentan el inconveniente de su dependencia de la temperatura y la pérdida de sus propiedades piezoeléctricas a medida que su temperatura se acerca al valor de Curie.

Los sensores electrónicos de ultrasonidos se basan en la reversibilidad del principio de funcionamiento de los materiales piezoeléctricos. Dichos materiales se caracterizan por generar una señal eléctrica al aplicarles una onda de presión (en este caso el sonido) y por ser capaces de vibrar y de generar ondas de presión cuando están inmersos en un medio elástico como por ejemplo el aire, cualquier otro fluido o un sólido, al aplicarles una excitación eléctrica. La figuras 11 y 12 muestran la composición de un transductor piezoeléctrico. Al transmitirse un impulso eléctrico a los cristales, éstos vibran de manera proporcional a la potencia de la electricidad dentro del transductor, creando ondas similares a las del sonido dentro de la campana.

Para realizar estudios de reflexión en objetos inmóviles o de tipo eco, el objeto puede ser un líquido, un sólido, granular o polvo, con la única restricción de que debe tener una impedancia acústica muy diferente de la del medio en el que se propagan los ultrasonidos, para que la mayor parte de la radiación se refleje.

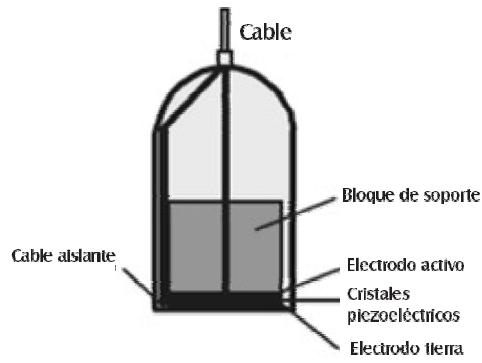


Figura 11: Transductor piezoeléctrico. (Modificado de Aldrich J. *Basic Physics of Ultrasound Imaging*. Crit Care Med 2007; 35 (suppl):S131-7)

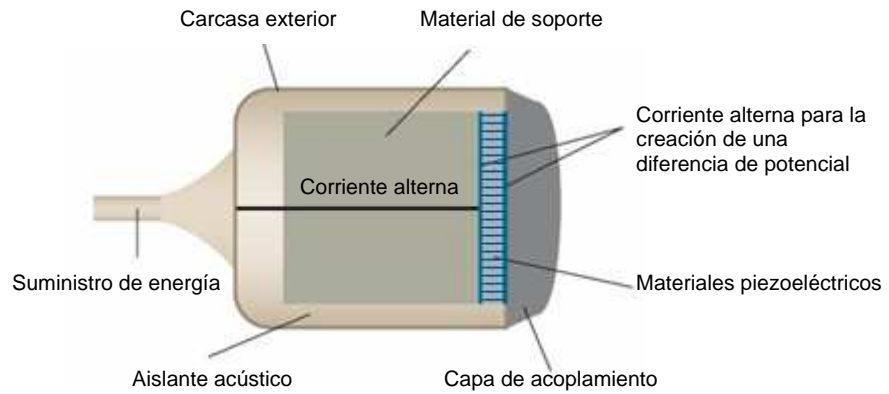


Figura 12: Partes principales de un transductor piezoeléctrico

En general se necesitan haces estrechos a fin de evitar reflexiones indeseadas, para lo cual la superficie de emisión debe ser grande con respecto a la longitud de onda del ultrasonido emitido. En este caso, además del cono de radiación fundamental se generan un conjunto de lóbulos secundarios en forma de anillos. El efecto de las interferencias acústicas es menor a altas frecuencias pero la atenuación de la onda es mayor. La figura 13 muestra el diagrama de radiación de un transductor piezoeléctrico.

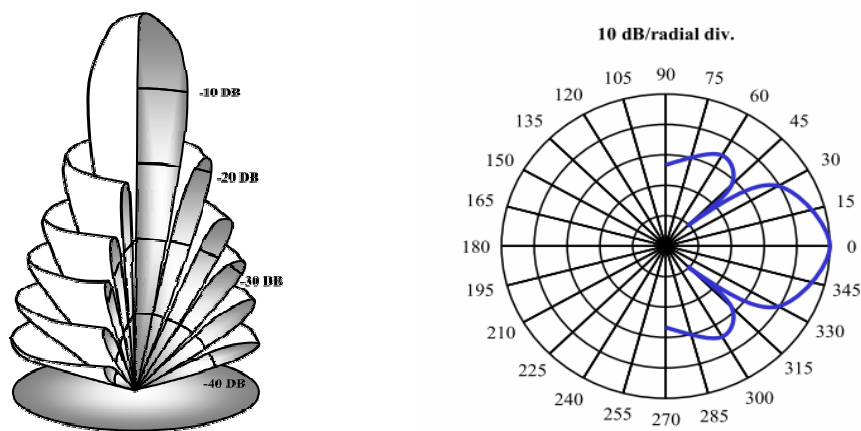


Figura 13: Diagrama de radiación de un transductor piezoeléctrico

## 2.5. Aplicaciones de los ultrasonidos

El uso de los ultrasonidos se extiende desde las aplicaciones industriales (medición de distancias, caracterización interna de materiales, ensayos no destructivos), hasta la ingeniería civil (detección de posibles anomalías) pasando por las aplicaciones médicas (diagnóstico por imágenes, fisioterapia, ultrasonoterapia y cirugía).

La cirugía con ultrasonido focalizado guiada por RM es un procedimiento ambulatorio, no invasivo, que usa ondas ultrasónicas focalizadas para destruir un conjunto de células. Puede utilizarse en neurocirugía para tratamiento de Parkinson y temblor esencial. También es utilizado en el tratamiento de fibromas uterinos, permitiendo su destrucción sin afectar ninguno de los otros tejidos alrededor del fibroma.

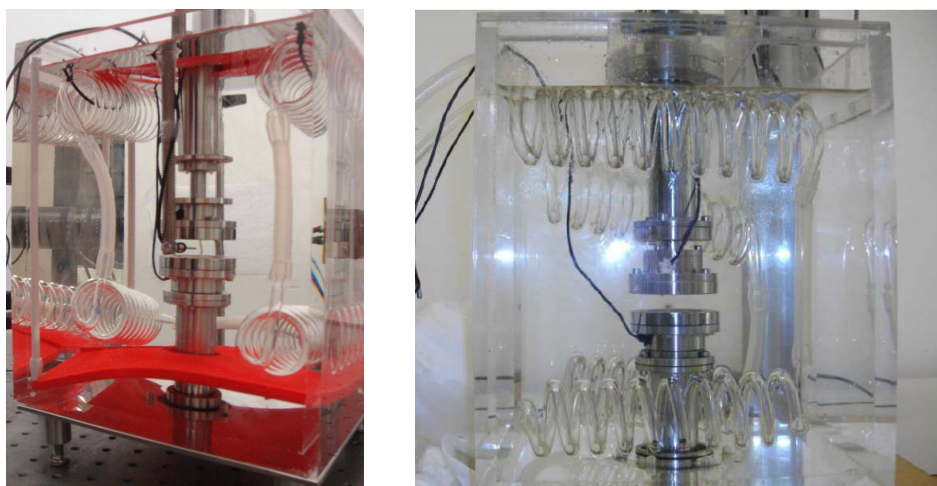
El ultrasonido terapéutico focalizado (FUS) es un método no invasivo para aplicar energía acústica en un tejido. Las aplicaciones incluyen la ablación de tejido (tratamientos de tumores), tratamientos de hipertermia (bajo nivel de calor combinada con radioterapia o quimioterapia), la activación o la mejora de la asimilación de fármacos en el organismo.

La técnica de hipertermia con ultrasonidos permite el aumento de la temperatura del tejido expuesto hasta los 41-45 °C, margen en el que las células cancerígenas tienen dificultad para reproducirse y sobrevivir.

Actualmente está aumentando el interés y los estudios centrados en el tratamiento por hipertermia de determinados tipos de cáncer (próstata, hígado, riñón, pecho, páncreas y óseo), así como el tratamiento de fibromas uterinos.

## 2.6. El resonador ultrasónico (interferómetro)

El resonador ultrasónico (interferómetro) es una cavidad con dos paredes paralelas, una que corresponde al emisor de ondas ultrasónicas de alta frecuencia del orden de 2 MHz (en el caso del dispositivo de nuestro laboratorio) y la otra una pared reflectante, que genera ondas planas estacionarias en su interior. Variando la frecuencia y la amplitud del emisor se puede estudiar y caracterizar el campo acústico en el interior del resonador.



*Figura 14: Resonador ultrasónico utilizado por Luís Salmerón en su TFM (Laboratorio de física EPSG-UPV)*

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una cavidad da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la cavidad. Estas ondas estacionarias son el resultado de la superposición de dos movimientos ondulatorios armónicos de igual amplitud y frecuencia que se propagan en sentidos opuestos a través de un medio. Una onda estacionaria es una onda acústica que, tras un recorrido por la cavidad, vuelve encontrarse en su punto de partida, no progresa. La energía no se propaga fuera del recorrido de esa onda. En ellas, habrá puntos con presión acústica mínima en todo instante (nodos), y otros con presión máxima (antinodos o vientres).

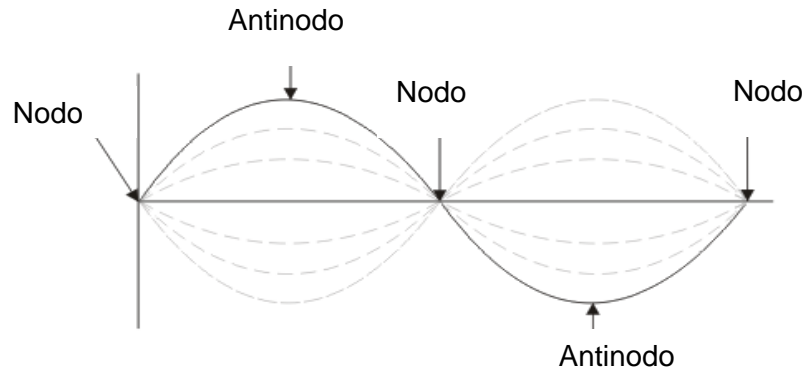


Figura 15: Representación de una onda estacionaria

Todo recinto posee unas frecuencias propias de vibración que le son características y que se explican por la formación de ondas estacionarias dentro del recinto. A cada frecuencia de las posibles ondas estacionarias que se forman en un recinto corresponde una frecuencia característica de un modo propio o natural de vibración del local. Vienen determinadas por las características del medio y la frecuencia, de forma que a medida que aumenta la frecuencia aumenta la densidad de modos propios.

El estudio que paralelamente se está realizando en el laboratorio de física pretende estudiar el comportamiento dinámico del campo ultrasónico cuando el resonador contiene distintos tipos de fluido (agua, glicerina o una mezcla de ambos), en función de la presión inyectada y de la desintonía. Se estudiará la evolución de los modos de resonancia en función temperatura, para lo cuál es determinante los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que permitirá decidir qué fluido es el óptimo para conseguir soluciones estables.

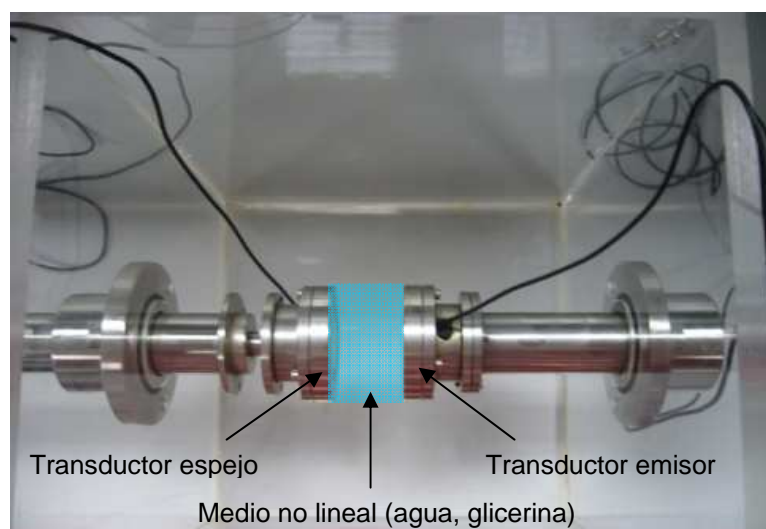


Figura 16: Representación de una onda estacionaria



### 3. Parámetros del medio

Un *fluido* es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le aplica un esfuerzo tangencial por pequeño que sea, apareciendo una deformación continua en forma de gradiente de velocidades (velocidad de deformación) como reacción frente al esfuerzo. Fluidos son *líquidos* y *gases*. Los líquidos se diferencian de los gases por la fluidez y menor movilidad de sus partículas y porque ocupan un volumen determinado, separándose del aire mediante una superficie plana. La materia no es continua sino que está compuesta por moléculas, las cuales interactúan entre sí a través de colisiones y fuerzas intermoleculares. La fase en la que se encuentra una materia es consecuencia directa del espaciamiento entre moléculas y las fuerzas intermoleculares.

En los sólidos las distancias son cortas y las fuerzas intermoleculares fuertes, lo suficiente como para que un trozo de materia mantenga su forma y su volumen.

En los líquidos las distancias son más largas y las fuerzas más débiles, lo que provoca que aunque tengan la suficiente intensidad como para mantener su volumen, no sean capaces de mantener la forma.

En los gases el espaciado entre moléculas posibilita una disminución drástica de las fuerzas que unen las moléculas entre sí, lo que hace que no puedan mantener ni forma ni volumen.

Podemos considerar una región de un fluido como continua cuando para un volumen dado, el cual contiene un número suficientemente grande de moléculas, el efecto de una molécula individual sobre las propiedades de densidad, temperatura o presión del fluido dentro de ese volumen son despreciables.

#### 3.1. Propiedades fundamentales de los líquidos

Los líquidos son sistemas deformables constituidos por un número infinito de puntos materiales aislados, infinitesimales. Se trata de sistemas continuos donde no existen "espacios vacíos" dentro de la masa.

Desde el punto de vista de la mecánica cabe destacar las siguientes propiedades fundamentales de los líquidos:

*Isotropía:* Se conocen como isótropos a las sustancias cuyas propiedades son idénticas en cualquier dirección.

*Movilidad:* Carencia de forma propia. Aptitud para adoptar cualquier forma, la del recipiente que los contiene.

*Viscosidad:* Propiedad por la que el líquido ofrece resistencia a los esfuerzos tangenciales que tienden a deformarlo.

*Compresibilidad:* Propiedad por la cual los líquidos disminuyen su volumen al estar sometidos a incrementos de presión positivos. En los líquidos esta disminución es muy pequeña, es decir, son poco compresibles.

Los líquidos que tienen las propiedades de isotropía, movilidad, incompresibilidad y no viscosos se llaman *líquidos perfectos*. Un líquido (fluido) perfecto no existe en la naturaleza. En los líquidos existe, en la realidad, una atracción molecular, especie de cohesión, que es la viscosidad, y que expresa la resistencia del líquido a dejarse cortar o separar.

### 3.2. Conceptos

#### 3.2.1. Densidad de un fluido

La densidad es una de las propiedades más habituales y útiles en el estudio de los fluidos, es el cociente entre la masa de una porción de fluido y el volumen que ocupa, ecuación (15):

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (15)$$

La densidad depende de la temperatura y la presión en todos los fluidos. Para una presión dada, si la temperatura aumenta la densidad disminuye, mientras que si disminuye, es la densidad la que aumenta. En cambio, para una temperatura dada, si la presión aumenta, la densidad también lo hace, disminuyendo cuando la presión lo hace.

#### 3.2.2. Presión atmosférica, relativa y absoluta

La *presión* es una fuerza normal ejercida sobre un cuerpo por unidad de superficie. Se mide en Pascales (S. I.), siendo  $1 \text{ Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

La *presión atmosférica* sobre un punto se define como el peso de la columna de aire, de base unidad, que gravita sobre dicho punto. Se mide con el *barómetro*, por lo que la presión atmosférica también se denomina *presión barométrica*. La presión atmosférica en condiciones normales es de 1 atm.

$$1 \text{ atm} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 10 \text{ m.c.a.} = 0.76 \text{ mHg} = 760 \text{ mmHg}$$

La presión que ejerce un líquido viene dada por la ecuación (16):

$$p = \frac{\text{peso}}{\text{Superficie}} = \frac{\gamma \cdot V}{S} = \gamma \cdot h \quad (16)$$

Esta ecuación representa la presión ejercida por una columna de líquido de altura  $h$ , peso específico  $\gamma(\rho \cdot g)$  y base unidad. Permite medir la presión mediante la *altura de presión*, que correspondería a la altura de una columna de agua que da lugar a una presión equivalente a la que soporta un punto determinado.

La *presión relativa* es la presión que existe sobre la presión atmosférica normal, es decir, tomando como origen de presiones la presión barométrica. Se mide con el *manómetro*, por lo que la presión relativa también se conoce como *presión manométrica*.

La *presión absoluta* que existe en un punto es la suma de las dos anteriores, es decir:

Presión absoluta = Presión barométrica + Presión manométrica

### 3.2.3. Compresibilidad de un líquido

Los líquidos son compresibles, aunque para su estudio puede despreciarse su compresibilidad, ya que es baja en comparación con la que presentan los otros fluidos, los gases.

Consideramos un tubo cilíndrico lleno de líquido a una presión  $p$ , en reposo, y lo comprimimos apretando un émbolo colocado en su extremo, como representa la figura.

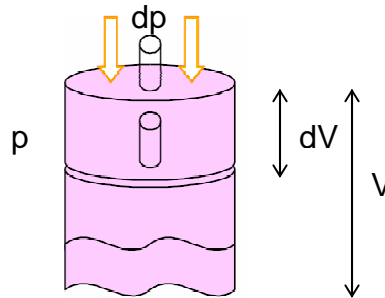


Figura 17: Compresibilidad de un líquido

La disminución de volumen, figura 18, respecto a la variación de presión aplicada será, ecuación (17):

$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (17)$$

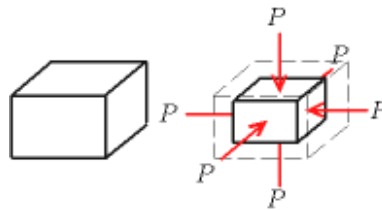


Figura 18: Contracción de un cuerpo debido a la presión hidrostática

donde  $p$  es la presión,  $V$  es el volumen,  $\Delta p$  y  $\Delta V$  denotan los cambios de la presión y de volumen, respectivamente. El módulo de compresibilidad o *coeficiente volumétrico de elasticidad*  $K$  tiene dimensiones de presión, por lo que se expresa en pascales (Pa) en el Sistema Internacional.

El módulo de compresibilidad ( $K$ ) de un material mide su resistencia a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dada.

La compresibilidad de un material viene dada por el coeficiente de compresibilidad ( $k$ ) y que es la inversa del módulo de compresibilidad o coeficiente volumétrico de elasticidad, ecuación (18).

$$k = \frac{1}{K} \quad (18)$$

Siendo su valor 0 para líquidos perfectos,  $\infty$  para gases y  $0,46 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$  para el agua (20°C).

Se dice que un material es más compresible que otro si experimenta mayor deformación o disminución del volumen cuando se someten a la misma presión. A menor compresibilidad ( $k$ ) del medio mayor rapidez de propagación del sonido.

El módulo de compresibilidad ( $K$ ) sirve para medir la compresibilidad de los fluidos, es decir, cuánto de sensible es el fluido a los cambios de presión, lo que se refleja en cambios en el volumen.

La propagación del sonido en un fluido depende principalmente de la densidad, la temperatura, la viscosidad, la compresibilidad y la elasticidad del mismo.

La temperatura tiene una gran influencia sobre la viscosidad. Al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye aumentando la velocidad de propagación del sonido. A medida que aumenta la elasticidad de un medio, aumenta consigo la velocidad de propagación del sonido.

La propagación varía de forma directa al módulo de compresibilidad volumétrico  $K$  e inversa a la densidad  $\rho$  y al coeficiente de compresibilidad  $k$ , tal y como muestra la ecuación (19):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot k}} ; \quad K = \frac{1}{k} ; \quad c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (19)$$

La densidad del agua a 20°C vale 998,2 kg/m<sup>3</sup> y la constante de compresibilidad,  $k$ , 45,66.10<sup>-11</sup> Pa<sup>-1</sup>.

La densidad de la glicerina a 20°C vale 1261,34 kg/m<sup>3</sup> y la constante de compresibilidad,  $k$ , 22,57.10<sup>-11</sup> Pa<sup>-1</sup>.

En el agua a medida que aumenta la temperatura aumenta la elasticidad lo que conlleva un aumento de la velocidad de propagación del sonido que lo atraviesa.

#### 3.2.4. Viscosidad

Se considera la lámina de fluido compuesta por infinitas capas paralelas, y la experiencia muestra que los fluidos oponen resistencia a ser deformados, es decir, a que cada lámina deslice sobre sus inmediatas, ya que al moverse una porción de fluido respecto a otra se originan fuerzas tangenciales que en algunos casos no pueden despreciarse. Se dice entonces que el líquido es *viscoso* y el fenómeno se denomina *viscosidad*. Debido a este fenómeno los fluidos no se comportan de forma ideal.

La viscosidad expresa la resistencia del líquido a dejarse cortar o separar. Por ejemplo, un avión o un submarino se mueven con esfuerzo porque han de deformar, respectivamente, el aire o el agua que los envuelve.

*Se llama viscosidad dinámica o simplemente viscosidad ( $\mu$ ) de un fluido a la resistencia que éste opone a su deformación, o dicho de otro modo, a que las láminas de fluido deslicen entre sus inmediatas.* La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él.

La viscosidad será el parámetro que nos permitirá medir la resistencia que ofrece un fluido al movimiento. Un indicador de la viscosidad de un fluido es la facilidad con que éste fluye.

Para una misma deformación, distintos fluidos oponen resistencias diferentes, es decir, *la viscosidad es una propiedad de los mismos.*

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido, relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad). La fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como  $F/A$  y se denota como " $\tau$ " (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad ( $du/dy$ ), o también denominado como  $D$ . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad, ecuación (20):

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{du}{dy} = \mu \cdot D \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (20)$$

Donde

$\tau$  : esfuerzo cortante (mPa)

$\mu$  : viscosidad (mPa·s)

$D$ : velocidad de deformación ( $s^{-1}$ )

Las unidades de viscosidad más utilizadas son los milipascales segundo, mPa·s (1000 mPa·s = 1 Pa·s). Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el centiPoise, cP (1 cp = 1 mPa·s).

Esta fórmula se denomina Ley de Newton, que es aplicable actualmente aún para unos fluidos determinados (Newtonianos). Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Los fluidos newtonianos son uno de los fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua en contraposición al pegamento, la miel o los geles y sangre que son ejemplos de fluido no newtoniano.

Un buen número de fluidos comunes se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión y temperatura: el aire, el agua, la gasolina, el vino, la glicerina y algunos aceites minerales. La glicerina y el agua son ejemplos muy comunes que obedecen la Ley de Newton. Para la glicerina, por ejemplo, la viscosidad vale 1000 mPa·s, en cambio para el agua la viscosidad vale 1 mPa·s, es decir, es mil veces menos viscosa que la glicerina.

Se utiliza también el *coeficiente de viscosidad cinemática* ( $\nu$ ), que relaciona la viscosidad absoluta ( $\mu$ ) con la densidad del fluido utilizado ( $\rho$ ), ecuación (22):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (22)$$

Las unidades más utilizadas de la viscosidad cinemática son los centistokes, cst (1 stoke = 100 centistokes =  $cm^2/s$ ).

La viscosidad de los fluidos se mide a través del coeficiente de viscosidad, un parámetro que depende de la temperatura. En los líquidos cuando la temperatura aumenta la viscosidad disminuye, y en los gases la viscosidad aumenta. Esto quiere decir que la viscosidad en fluidos líquidos es inversamente proporcional al aumento de la temperatura. La ecuación de Arrhenius predice de manera aproximada la viscosidad mediante la ecuación:

$$\mu(T) = Ae^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (23)$$

Donde T es la temperatura absoluta  
A y B son constantes del material estudiado

Algunos ejemplos cotidianos son ejemplos de la variación de la viscosidad de los fluidos con la temperatura. Por ejemplo el aceite para motor, por lo general, es bastante difícil de vaciar cuando está frío, lo cual indica que tiene una viscosidad alta. Conforme la temperatura del aceite va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente. Todos los fluidos exhiben este comportamiento en algún grado. En la figura 19 se presentan las gráficas de la variación con la temperatura de la viscosidad dinámica de diferentes fluidos. Se puede observar el diferente comportamiento frente a la temperatura de la glicerina y del agua. En la glicerina se producen cambios mayores de la viscosidad con la temperatura respecto al agua.

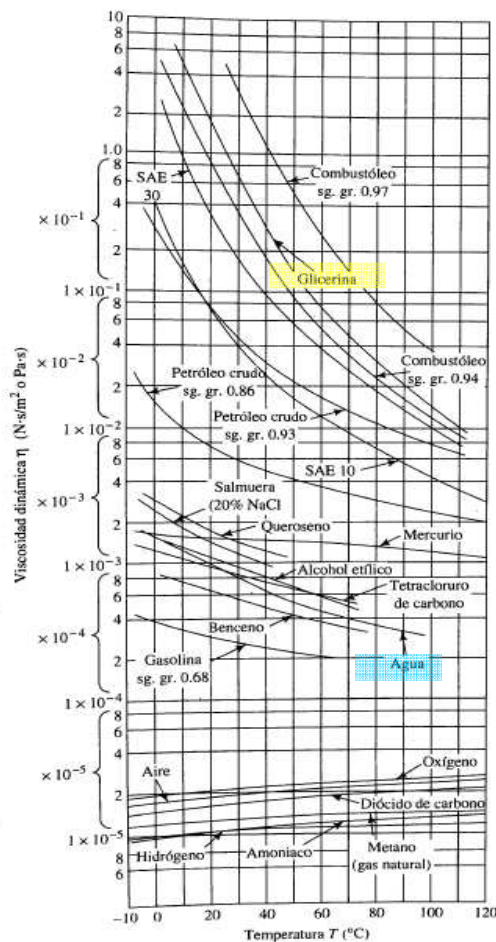


Figura 19: Variación de la viscosidad con la temperatura (Robert L. Mott)

### 3.2.5. Agua

El agua químicamente pura es un líquido inodoro e insípido, incoloro y transparente. Sus constantes físicas sirvieron para marcar los puntos de referencia de la escala termométrica Centígrada. A la presión atmosférica de 760 milímetros el agua hierve a temperatura de 100°C y el punto de ebullición se eleva a 374°C, que es la temperatura crítica a que corresponde la presión de 217,5 atmósferas; en todo caso el calor de vaporización del agua asciende a 539 calorías/gramo a 100°C.

El agua se comporta anormalmente. Su presión de vapor crece con rapidez a medida que la temperatura se eleva y su volumen ofrece la particularidad de ser mínimo a la temperatura de 4°C. A dicha temperatura la densidad del agua es máxima, y se ha tomado por unidad. A partir de 4°C no sólo se dilata cuando la temperatura se eleva, sino también cuando se enfría hasta 0°C. A esta temperatura su densidad es 0,99980 g/cm<sup>3</sup> y al congelarse desciende bruscamente hacia 0,9168 g/cm<sup>3</sup>, que es la densidad del hielo a 0°C, lo que significa que en la cristalización su volumen aumenta en un 9 por 100.

Las propiedades físicas del agua se atribuyen principalmente a los enlaces por puente de hidrógeno, los cuales se presentan en mayor número en el agua sólida, en la red cristalina cada átomo de la molécula de agua está rodeado tetraédricamente por cuatro átomos de hidrógeno de otras tantas moléculas de agua y así sucesivamente es como se conforma su estructura. Cuando el agua sólida (hielo) se funde la estructura tetraédrica se destruye y la densidad del agua líquida es mayor que la del agua sólida debido a que sus moléculas quedan más cerca entre sí, pero sigue habiendo enlaces por puente de hidrógeno entre las moléculas del agua líquida. Cuando se calienta agua sólida, que se encuentra por debajo de la temperatura de fusión, a medida que se incrementa la temperatura por encima de la temperatura de fusión se debilita el enlace por puente de hidrógeno y la densidad aumenta más hasta llegar a un valor máximo a la temperatura de 3.98°C y una presión de una atmósfera. A temperaturas mayores de 3.98 °C la densidad del agua líquida disminuye con el aumento de la temperatura de la misma manera que ocurre con los otros líquidos.

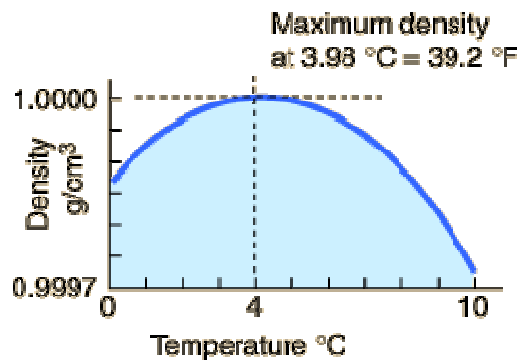


Figura 20: Variación de la densidad del agua con la temperatura

Las principales propiedades físicas del agua las podemos resumir en la tabla 1:

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad K (kN/m <sup>2</sup> )	Viscosidad dinámica (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m <sup>2</sup> )
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	$2,07 \cdot 10^6$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	0,0589	101,33

Tabla 1: Principales propiedades físicas del agua



Otras propiedades físicas del agua son:

Impedancia acústica del agua:  $1.48 \cdot 10^6 \text{ Kg/m}^2\text{s}$

Velocidad de propagación del sonido (20°C): 1.480 m/s

La figura 21 muestra la velocidad de propagación del sonido en el agua en el margen de temperaturas entre 0°C y 100°C resultado de la ecuación propuesta por W. Marczak (24).

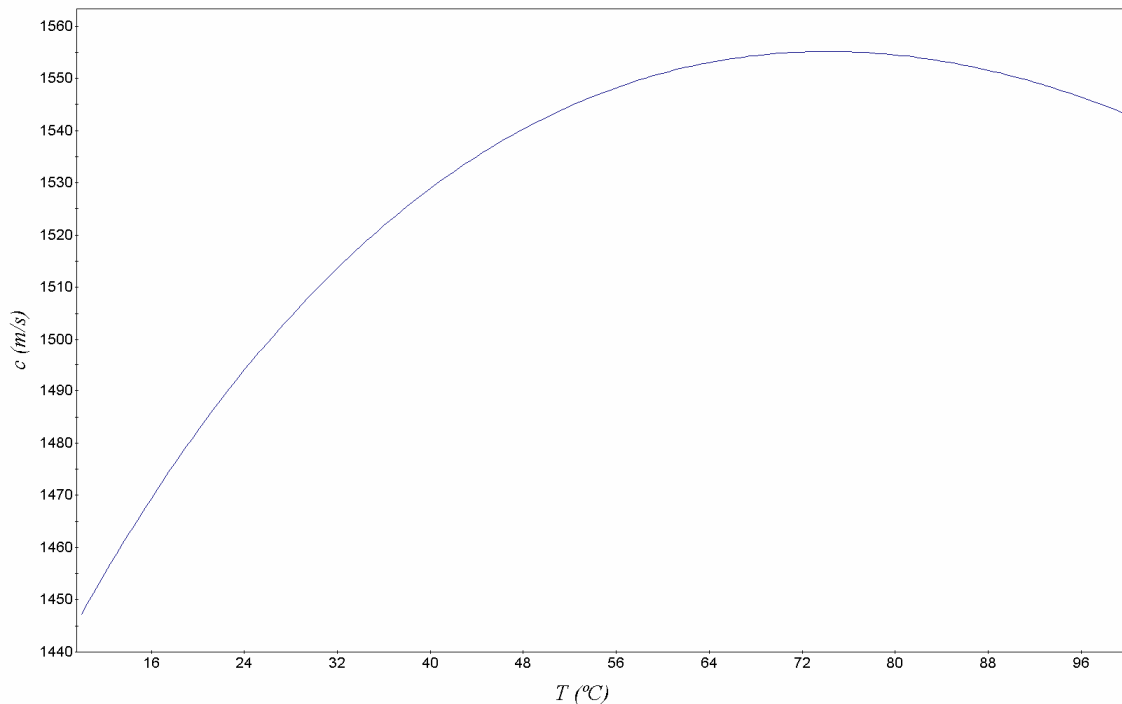


Figura 21: Velocidad de propagación del agua (W. Marczak, 1997)

$$c = 1.40238510^3 + 5.038813 T - 5.79913610^{-2} T^2 + 3.28715610^{-4} T^3 - 1.39884510^{-6} T^4 + 2.78786010^{-9} T^5 \quad (24)$$

### 3.2.6. Glicerina

La glicerina es el término comercialmente más usado al referirse al glicerol.

El Propanotriol, glicerol o glicerina ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) del griego Glykos (dulce), es un alcohol con tres grupos hidroxilos (-OH).

Se trata de uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos, paso previo para el ciclo de Krebs y también aparece como un producto intermedio de la fermentación alcohólica. Además junto con los ácidos grasos, es uno de los componentes de lípidos como los triglicéridos y los fosfolípidos.

Se presenta en forma de líquido a una temperatura ambiental de 25°C y es higroscópico e inodoro. Posee un coeficiente de viscosidad alto y tiene un sabor dulce como otros polialcoholes.

El glicerol está presente en todos los aceites, grasas animales y vegetales en forma combinada, es decir, vinculado a los ácidos grasos como el ácido esteárico, oleico, palmítico y ácido láurico para formar una molécula de triglicéridos. Los aceites de coco y de palma contienen una cantidad elevada (70-80 por ciento) de ácidos grasos de cadena de carbono (6 a 14 átomos de carbono). Estos producen más moléculas de glicerol en los aceites que contienen ácidos grasos de 16 a 18 átomos de carbono, como las grasas, el aceite de semilla de algodón, el aceite de soja, el aceite de oliva y el aceite de palma. El glicerol combinado también está presente en todas las células animales y vegetales como parte de su membrana celular en forma de fosfolípidos.

El 70% del glicerol producido en la actualidad procede de los glicéridos (grasas y aceites naturales), y el resto de la producción de glicerina sintética (subproducto del propileno), la producción de ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos (subproducto durante la elaboración de biodiesel).

Las principales propiedades del glicerol pueden resumirse en la tabla 2.

Propiedades del glicerol (glicerina)	
Altamente inflamable. Agente reductor fuerte además de ser polimerizable.	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Densidad	1,261 kg/dm <sup>3</sup>
Masa molar	92,09382 g/mol
Punto de fusión (paso de sólido a líquido)	17,85 °C
Punto de ebullición (paso de líquido a gas)	289,85 °C
Viscosidad	1,5 Pa.s
Impedancia acústica (a 20°C)	2.42·10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> s
Velocidad de propagación del sonido (20°C)	1.920 m/s
Módulo de compresibilidad K	3,053·10 <sup>9</sup> Pa; 3,053·10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup>
Propiedades químicas del glicerol	
Solubilidad en agua. Miscible.	
Obtención del glicerol	
A partir de propileno, como subproducto de la hidrólisis de ácidos grasos y aceites o partir de procesos fermentativos.	

Tabla 2: Propiedades físicas de la glicerina

La densidad de la glicerina depende de la concentración y de la temperatura de la misma. En estudios publicados por Bosart-Snoddy y Miner-Dalton (American Chemical Society Monograph 117-1953) se observa que la densidad disminuye conforme aumenta la temperatura, y aumenta conforme aumenta la concentración, obteniendo el menor valor de densidad para concentraciones del 10% a 100 °C (0,9818 kg/m<sup>3</sup>) y el mayor valor para concentraciones del 100% a 0 °C (1,2726 kg/m<sup>3</sup>), tal y como se observa en la tabla 3.

Densidad de soluciones de glicerina-agua (kg/dm <sup>3</sup> )										
Temperatura (°C)	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	1,24683	1,21962	1,192	1,16349	1,13486	110.667	1,07892	1,05161	1,02517	0,99987
10	1,24124	1,2144	1,18701	1,15909	1,13101	1,10336	1,07623	1,04951	1,02414	0,99973
20	1,2351	1,2085	1,18125	1,1538	1,1263	1,0993	1,0727	1,0469	1,0221	0,99823
30	1,22865	1,20231	1,17519	1,14822	1,12096	1,09452	1,06856	1,04347	1,01916	0,99567
40	1,22214	1,19606	1,1692	1,14247	1,11534	1,08924	1,06371	1,03945	1,01552	0,99224
50	1,2158	1,18999	1,16338	1,13655	1,10945	1,0038	1,05849	1,03505	1,01131	0,98807
60	1,20922	1,18352	1,15683	1,13015	1,1034	1,078	1,05291	1,02958	1,00625	0,98324
70	1,20269	1,17679	1,15036	1,12382	1,09723	1,07184	1,04729	1,02386	1,00065	0,97781
80	1,19611	1,1699	1,14384	1,11745	1,09079	1,06564	1,04093	1,01752	0,99463	0,97183
90	1,18961	1,16332	1,1373	1,11094	1,08423	1,05901	1,0343	1,01097	0,9884	0,96534
100	1,18273	1,15604	1,13018	1,10388	1,07733	1,05217	1,02735	1,00392	0,98187	0,95838

Temperatura (°C)	100%
0	1,27269
10	1,26699
15	1,26443
20	1,26134
30	1,25512
40	1,24896
54	1,2397
75,5	1,2256
99,5	1,2097

Tabla 3: Densidad de diferentes concentraciones de glicerina-agua. (Bosart-Snoddy; Miner-Dalton-Physical properties of glycerol and its solutions)

A partir de los resultados obtenidos por Bosart-Snoddy y Miner-Dalton publicados en el estudio "Physical properties of glycerol and its solutions" en 1967 por la asociación de productores de glicerina, y con los resultados obtenidos en este estudio relativos a las velocidades de propagación del sonido en las diferentes concentraciones, obtenemos el módulo de compresibilidad de las diferentes soluciones y por tanto su elasticidad. Los resultados los podemos ver en la tabla 4:

Temperatura (°C)	K (-10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup> )									
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
10	3,024	2,770	2,537	2,490	2,249	2,102	1,912	1,765	1,629	1,456
20	2,969	2,721	2,494	2,455	2,226	2,089	1,910	1,777	1,648	1,482
30	2,909	2,669	2,449	2,417	2,196	2,069	1,902	1,779	1,660	1,498
40	2,842	2,616	2,402	2,375	2,163	2,045	1,888	1,777	1,663	1,503
50	2,779	2,564	2,354	2,328	2,125	1,729	1,866	1,767	1,663	1,503
60	2,717	2,508	2,303	2,280	2,086	1,981	1,840	1,747	1,650	1,495

Temperatura (°C)	K (-10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup> )
	100%
10	3,089
15	3,060
20	3,029
30	2,969
40	2,911
54	2,822

Tabla 4: Módulo de compresibilidad K obtenido a partir de los valores de densidad obtenidos por Bosart-Snoddy y Miner-Dalton (tabla 3), y los valores de velocidad de propagación obtenidos en el presente estudio (Anexo II).

La figura 22 muestra la velocidad de propagación del sonido en glicerina (99,5%) en el margen de temperaturas entre 0°C y 100°C.

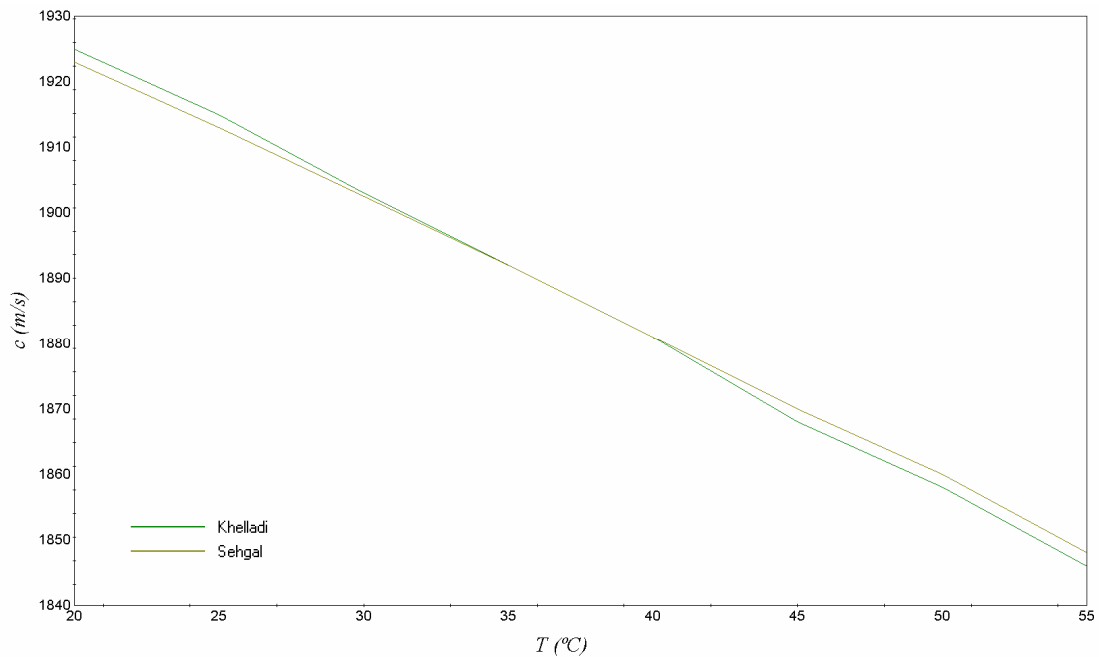


Figura 22: Velocidad de propagación del sonido en glicerina 99,5%. (Elder Both, 2010)

#### 4. Procedimiento experimental

##### 4.1. Material e instrumental empleado

Para la determinación de la velocidad de propagación del sonido en un medio compuesto por glicerina y agua en diferentes concentraciones, se ha seguido el procedimiento detallado a continuación, empleando para tal fin el siguiente instrumental:

Transductor piezoeléctrico de frecuencia 1MHz y generador de impulsos Parametrics 500PR.

Osciloscopio Tektronix TDS 220

Termómetro digital de precisión testo 110.

Glicerina (99,9% de pureza).

Recipientes estancos para conservar las diferentes concentraciones de agua-glicerina.

Calibre Metrica (0,05 mm).

Hornillo eléctrico de laboratorio.

Refrigerador.

Ordenador personal para registro y análisis de los resultados obtenidos.

#### 4.2. Cálculo del coeficiente de reflexión de la interfaz solución-recipiente

Como se ha mencionado anteriormente, en la técnica de eco-impulso es importante que el objeto inmóvil que produce la reflexión del sonido tenga una impedancia acústica muy diferente de la del medio en el que se propagan los ultrasonidos, para que la mayor parte de la radiación se refleje.

Para determinar el coeficiente de reflexión de la interfaz solución-vidrio, se ha partido de los siguientes datos, considerados a T=20°C:

Impedancia acústica del vidrio:  $13.1 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s.

Velocidad de propagación del sonido en el vidrio: 5.640 m/s.

Impedancia acústica de la glicerina:  $2.42 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s

Impedancia acústica del agua:  $1.48 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s

El coeficiente de reflexión de la interfaz solución-vidrio obtenido a partir de los datos anteriormente expuestos lo podemos ver en la siguiente tabla:

Concentraciones % (de glicerina)	Z <sub>1</sub> kg/m <sup>2</sup> s	$R_I = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$
0	1480000	0,635
10	1574000	0,617
20	1668000	0,599
30	1762000	0,582
35	1809000	0,573
40	1856000	0,565
45	1903000	0,557
50	1950000	0,549
60	2044000	0,533
70	2138000	0,517
80	2232000	0,502
90	2326000	0,488
100	2420000	0,473

Tabla 5: Determinación del coeficiente de reflexión de la interfaz solución-recipiente

Siendo Z<sub>1</sub> la impedancia acústica de la solución agua-glicerina y Z<sub>2</sub> la impedancia acústica del vidrio.

El coeficiente de reflexión medio es de aproximadamente 0,55 lo cual nos indica que aproximadamente un 45% del campo acústico se refleja en la interfaz solución-recipiente, variando entre un valor mínimo de 0,473 para la glicerina pura y un valor máximo de 0,635 para el agua pura.

### 4.3. Proceso de registro de medidas

El tipo de sensor ultrasónico utilizado en este estudio es de reflexión en objetos inmóviles o de tipo eco.

Se mide el tiempo que tarda en recibirse el eco de un impulso emitido, debido a la reflexión sobre un objeto presente en el camino de propagación de la radiación, en nuestro estudio el recipiente de vidrio.

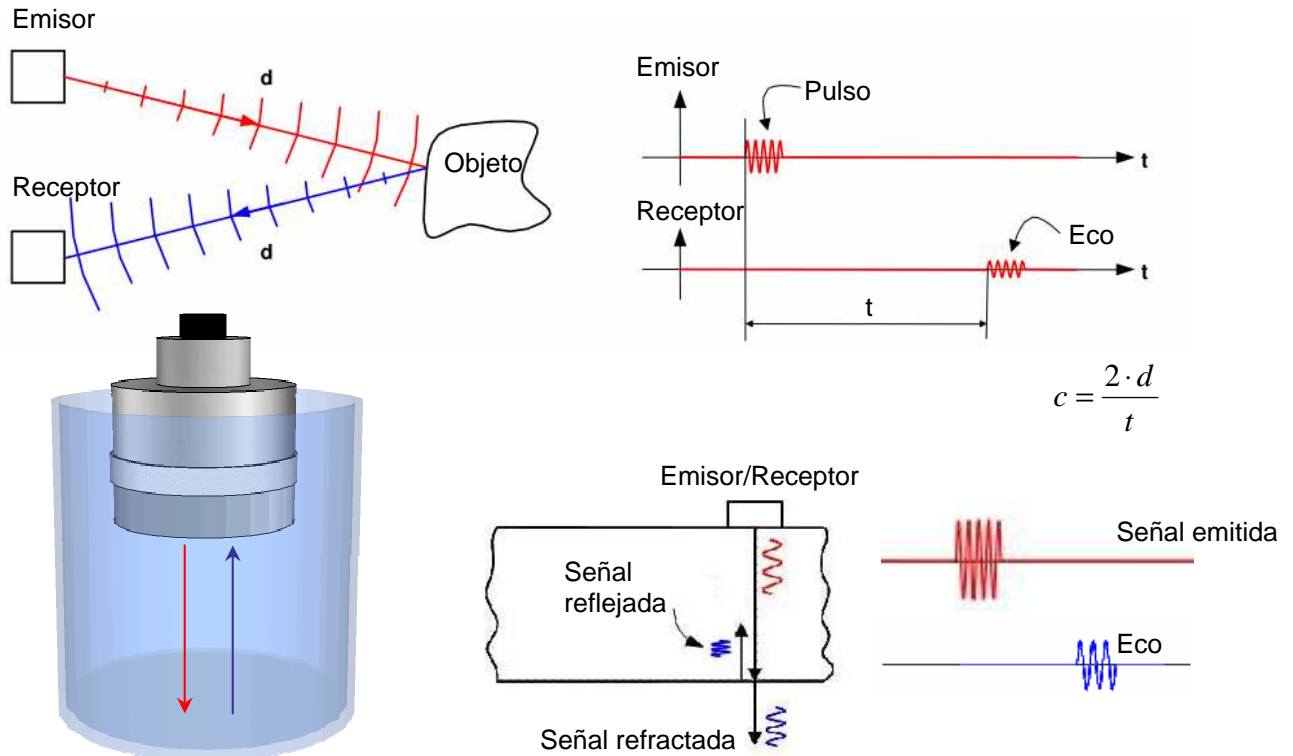


Figura 23: Proceso de emisión-recepción del pulso-eco ultrasónico

El estudio comienza con la preparación de las diversas concentraciones de glicerina y agua. El volumen total inicial de cada una de las concentraciones es de 300 ml. Se preparan, en un principio, 11 concentraciones (en tanto por cien en volumen) que van desde el 0% hasta el 100% de glicerina en incrementos del 10% de glicerina.

A continuación se procede a medir la velocidad de propagación para cada una de las concentraciones en un intervalo de temperatura comprendido entre 10°C y 65°C, en intervalos de 0,5°C.

Se emplea un generador de impulsos, que produce un impulso eléctrico para excitar al transductor piezoeléctrico, encargado de convertir la entrada eléctrica en energía mecánica, creación de una onda ultrasónica. En las aplicaciones de pulso-eco, el ultrasonido viaja a través del material de ensayo hasta que éste se refleja en la interfaz regresando, de nuevo al transductor. El transductor reconvierte el impulso mecánico en una señal eléctrica que luego se amplifica para su posterior análisis. La visualización y análisis de la misma se lleva a cabo en el osciloscopio digital Tektronix TDS 220.



Figura 24: Generador de impulsos Parametrics 500PR.

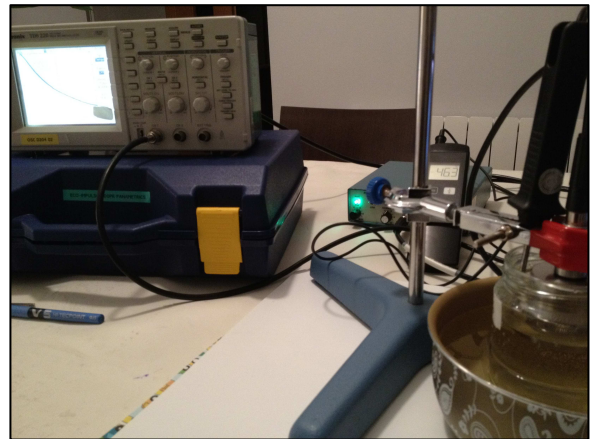


Figura 25: Osciloscopio digital, generador de impulsos, transductor piezoeléctrico y termómetro digital



Figura 26: Detalle del transductor piezoeléctrico y registro de temperatura (izquierda). Visión general del proceso de medición (derecha).

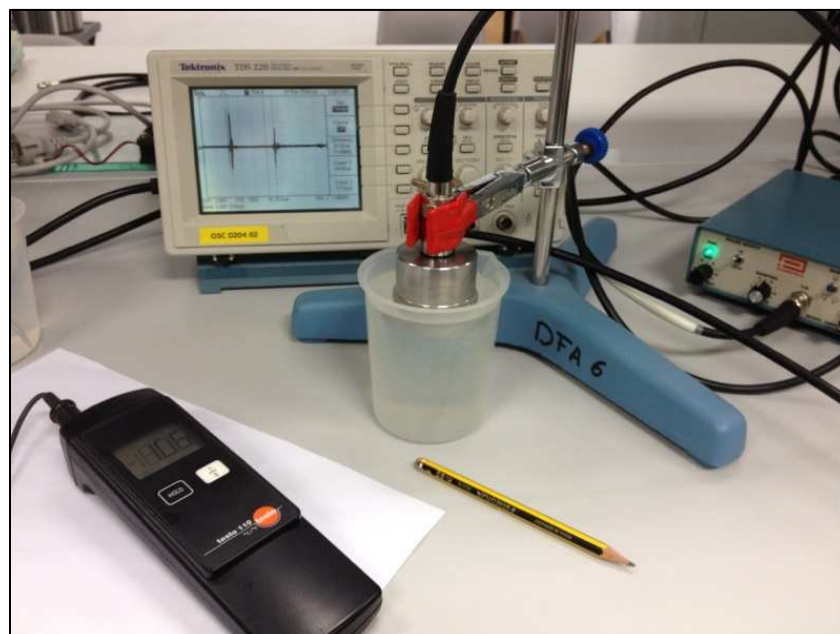


Figura 27: Detalle del montaje y ensayo previo a la realización del estudio, llevado a cabo en el laboratorio de física aplicada de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

A fin de reducir la incertidumbre al mínimo, se trabaja siempre en la menor de las escalas del osciloscopio, 5 ns de paso, y determinándose la distancia temporal entre el pulso y el eco tomando como referencia el primer paso por cero de ambas señales. Para ello se registra el tiempo en el punto exacto en el que se produce este cruce en la señal enviada y posteriormente se mide el tiempo correspondiente para el eco producido. La diferencia entre ambos tiempos nos indica el tiempo de vuelo del ultrasonido empleado durante su propagación entre el transmisor y el receptor.

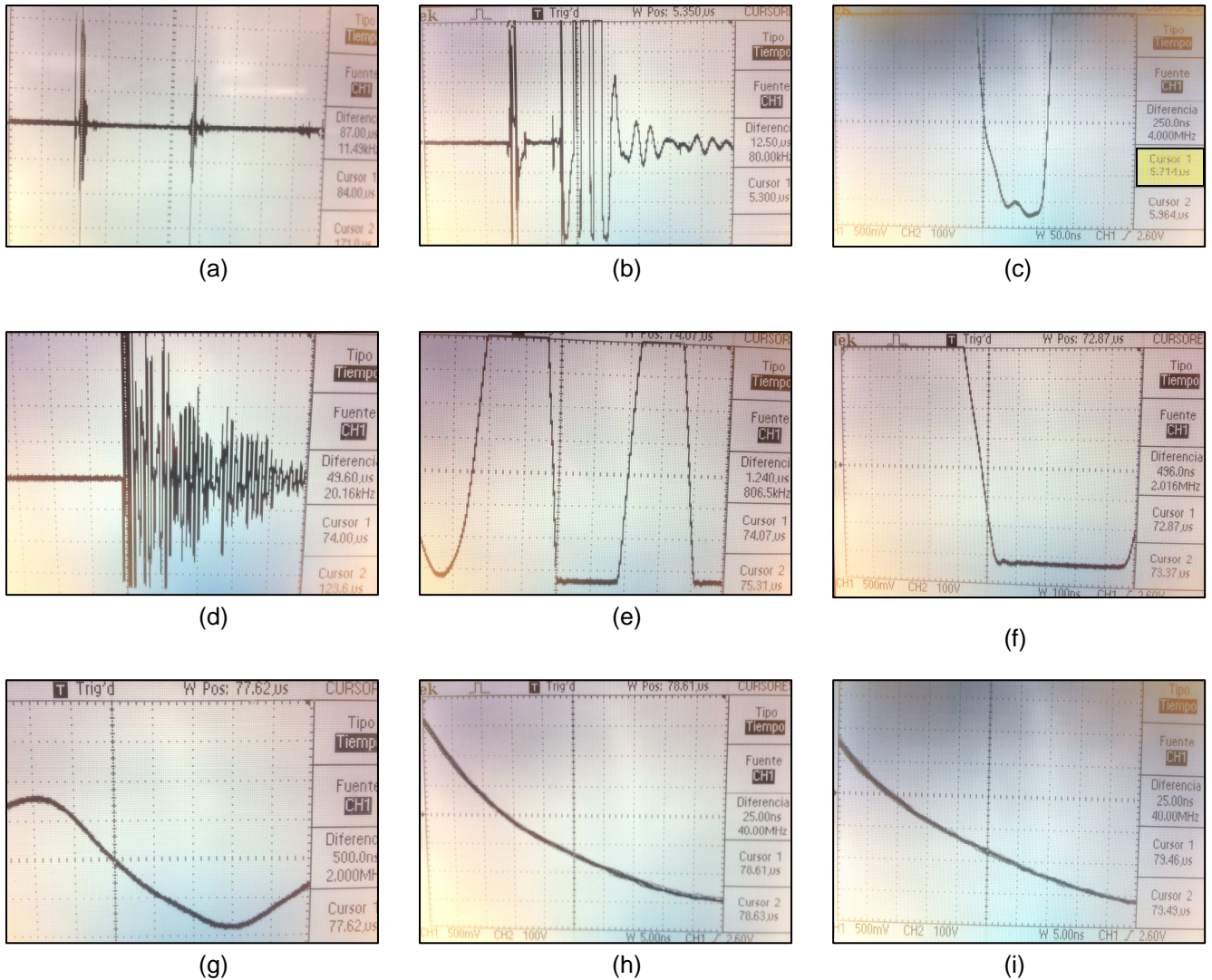


Figura 28: Capturas de la pantalla del osciloscopio. Visualización del impulso y del eco recibido (87  $\mu$ s en este ejemplo)(a). Ampliación progresiva de la señal en el osciloscopio a fin de reducir la incertidumbre en la medida, primer paso por cero de las señales enviadas (b,c) y recibidas (d, e, f, g, h, i). Medida del punto del primer paso por cero de la señal emitida (aproximadamente 5,714  $\mu$ s (c)). Medida del punto del primer paso por cero de la señal recibida, eco (en torno a 77,62  $\mu$ s) (g).



El pulso comienza aproximadamente en  $5,7 \mu\text{s}$  en todos los casos y el eco se produce en torno a los  $70\text{-}80 \mu\text{s}$ , dependiendo éste último de la concentración y de la temperatura en la que se ha realizado la medida.

Previo al registro de datos, se mide la distancia entre el transductor y el fondo del recipiente de vidrio a fin de poder obtener, posteriormente, la velocidad de propagación en dicho medio. Dicha longitud se mide por medio de un calibre o pie de rey de  $0,05 \text{ mm}$  precisión.



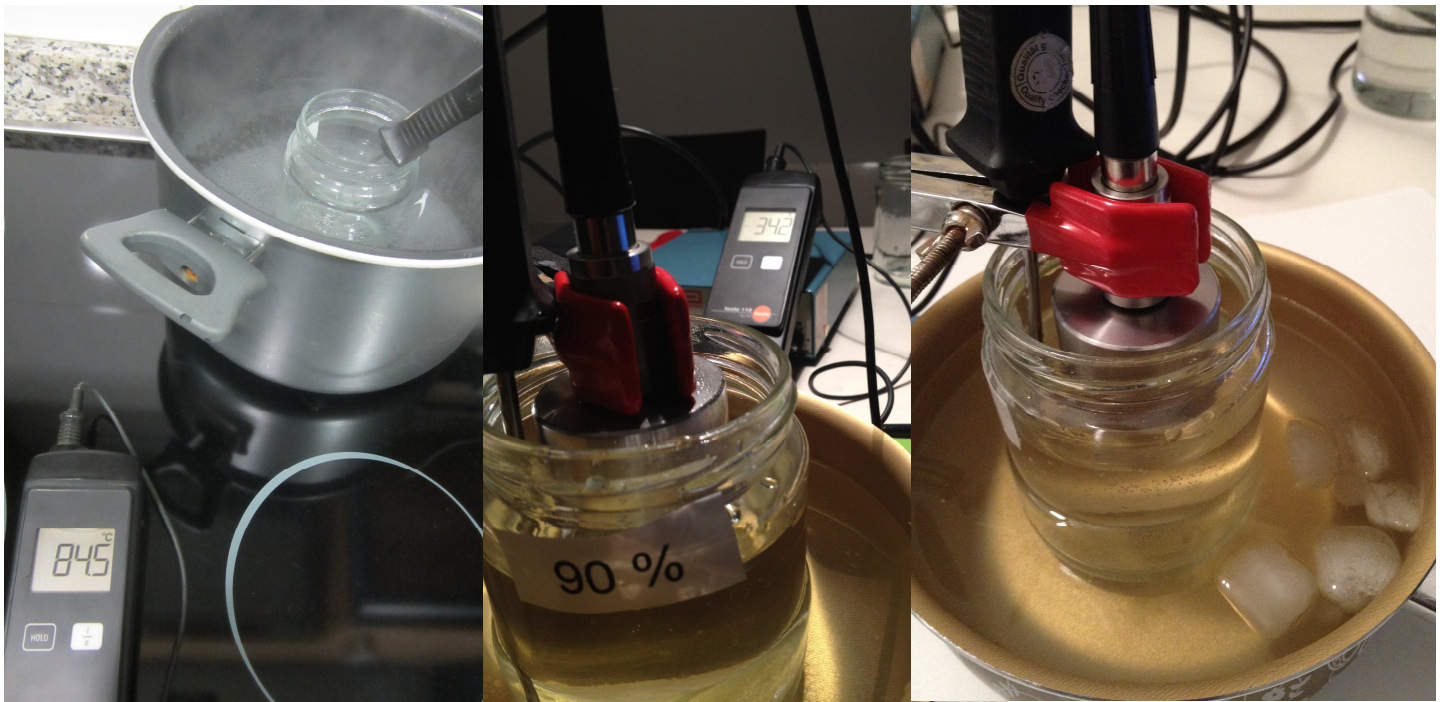
*Figura 29: Detalle del calibre utilizado en la medida de la distancia entre el transductor piezoeléctrico y el fondo del recipiente de vidrio.*

A partir de estos dos datos, tiempo de vuelo y distancia entre el transductor y el recipiente, se obtiene la velocidad de propagación.

Para conseguir el intervalo de temperaturas requerido en este estudio, se calienta cada concentración por baño térmico hasta alcanzar los  $70\text{-}75^\circ\text{C}$ , utilizando para ello un hornillo eléctrico. Una vez alcanzada dicha temperatura, se realiza la toma de datos manteniendo en todo momento el recipiente bajo estudio en baño térmico a fin de reducir la velocidad de enfriamiento y garantizar al mismo tiempo que todo el recipiente esta sometido a una temperatura homogénea. Se remueve continuamente la concentración a fin de garantizar su homogeneidad, esperando a que la temperatura se estabilice y descienda hasta los  $65^\circ\text{C}$  para proceder al registro de datos.

Se registra la temperatura durante todo el proceso, anotando el tiempo obtenido en el osciloscopio para cada descenso de  $0,5^\circ\text{C}$ . Por medio de intercambio de agua caliente con agua menos caliente vamos reduciendo de forma progresiva la temperatura del baño térmico y con ello la de la concentración bajo estudio. Llegados a los  $17^\circ\text{C}$  se añade hielo, de forma progresiva, en el baño térmico a fin de conseguir reducir la temperatura del fluido hasta los  $10^\circ\text{C}$ , siendo éste el límite inferior de temperatura del estudio.

El tiempo empleado para realizar cada una de las mediciones ha sido de entre  $3,5\text{-}4$  horas en función de la concentración, siendo éste mayor para las soluciones con mayor concentración de glicerina.



*Figura 30: Baño térmico. Calentamiento de la muestra, toma de datos y enfriamiento de la muestra.*

A raíz de los resultados (ver anexo II) y atendiendo al comportamiento casi lineal en un margen de temperaturas de la concentración correspondiente al 40%, se toman mediciones adicionales para concentraciones del 35% y del 45% de glicerina.

Tras la medida de la velocidad de propagación, se calcula la densidad de las diferentes concentraciones en la franja en la que el comportamiento del fluido es más estable respecto con la temperatura, entre 15°C y 30°C, a fin de poderlos comparar con resultados obtenidos en otros estudios previos centrados en el comportamiento físico de la glicerina (Bosart-Snoddy y Miner-Dalton).

## 5. Resultados obtenidos

Los errores accidentales son implícitos al propio proceso de medida. Se pueden reducir repitiendo la medida varias veces. Para el cálculo del mejor resultado (el probablemente más cercano al exacto) y del error accidental se utilizan técnicas estadísticas. El método utilizado depende del tipo de medida. Se distinguen dos métodos: uno para las medidas directas y otro para las indirectas.

### 5.1. Errores accidentales en medidas directas

En las medidas directas, el valor que se toma como resultado de una serie de  $n$  medidas de la misma magnitud y en las mismas condiciones es la media aritmética,  $\bar{x}$ , de los valores obtenidos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (25)$$

Pero cuando los valores obtenidos fluctúan se realizarán varias medidas y cuanto mayor sea el número de medidas realizadas, menor es la incertidumbre asociada al resultado.

En nuestro caso al haber una pequeña fluctuación en los resultados obtenidos, valoramos si el número de medidas utilizado en el estudio era suficiente aplicando un criterio basado en la dispersión de las medidas. La dispersión de una serie de medidas es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo obtenidos, dividido entre el valor medio y expresado en tanto por cien.

$$D = \frac{|x_{\max} - x_{\min}|}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (26)$$

En nuestro caso se tomaron tres medidas para cada concentración y temperatura. El valor de la dispersión obtenido para cada concentración no supera en ningún caso el valor del 2%, lo que nos indica que no es necesaria la realización de más medidas.

Tras la determinación del error absoluto de las medidas directas, observamos que es mayor que la precisión del aparato, por lo que tomamos la de este último como error absoluto de la medida.

### 5.2. Determinación de la incertidumbre absoluta de una medida indirecta

La incertidumbre de una medida indirecta se calcula mediante la teoría de diferenciales, y este error dependerá de los valores y de los errores de las magnitudes utilizadas para el cálculo del valor de la medida.

Para el cálculo de la velocidad de propagación de una onda acústica a través de un medio se utiliza la ecuación (27):

$$c = \frac{2 \cdot l}{t} \quad (27)$$

Entendiendo  $l$  como la magnitud que realmente se está midiendo en este estudio. Si existe un error midiendo dicha distancia, éste será el mismo para el trayecto de ida como para el de vuelta, por lo que el error será doble.

Supongamos una función  $y$  que dependa de  $n$  variables, ecuación (28):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (28)$$

La incertidumbre absoluta se calculará como la suma de las contribuciones que tenga cada variable dentro de la función, su derivada, por el error cometido al medirlas, ecuación (29).

$$\varepsilon(y) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \varepsilon(x_i) \quad (29)$$

Utilizando la teoría de propagación de incertidumbre y haciendo corresponder los diferenciales con los errores absolutos, la función (27) puede ser expresada según la ecuación (30):

$$\varepsilon(c) = \left| \frac{\partial c}{\partial l} \right| \varepsilon(l) + \left| \frac{\partial c}{\partial t} \right| \varepsilon(t) \quad (30)$$

Resultando la ecuación (31):

$$\varepsilon(c) = \frac{2}{t} \varepsilon(l) + \frac{2l}{t^2} \varepsilon(t) \quad (31)$$

$$\varepsilon(c) = \frac{2 \cdot \varepsilon(l) + c \cdot \varepsilon(t)}{t}$$

La incertidumbre asociada al proceso de toma medidas durante la realización de este estudio ha venido dada por la medida de la distancia por medio del calibre,  $\varepsilon(l) = 0,05mm$  y la medida del tiempo de vuelo con el osciloscopio y su incertidumbre asociada  $\varepsilon(t) = 5ns$ .

La desviación media de los valores obtenidos de velocidad de propagación del sonido se sitúa en torno a  $\pm 1,2$  m/s, lo que representa un error relativo del 0,07%.

### 5.3. Curvas de velocidad de propagación

A continuación se muestran las curvas resultantes de las medidas realizadas en este estudio.

A medida que va aumentando la concentración de glicerina observamos que la velocidad de propagación también va aumentando.

Por lo general, la densidad y la viscosidad de un fluido disminuyen con la temperatura, lo que produce un aumento de la velocidad de propagación del sonido a su través. En el agua la velocidad de propagación aumenta con la temperatura mientras que en la glicerina la velocidad se produce el efecto contrario, debido a que su elasticidad disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Podemos apreciar como va cambiando poco a poco el comportamiento del fluido en función de la concentración de agua y glicerina. Las curvas en las que se produce la inflexión, en el rango de temperaturas de interés (alrededor de los 20°C que es el régimen de funcionamiento de los resonadores acústicos), entre el dominio de las propiedades acústicas del agua para pasar a dominar las propiedades acústicas de la glicerina, se produce en torno a la concentración del 35-40% de glicerina.

Atendiendo a las concentraciones entre el 35% y el 40%, apreciamos que la curva que describe la velocidad de propagación se mantiene estable para casi todo el margen de temperaturas estudiado, siendo más perceptible este hecho en el margen de temperaturas comprendido entre los 19,5°C y los 38°C.

Para concentraciones del 35% de glicerina la velocidad de propagación media se sitúa en torno a 1708,4 m/s, manteniéndose estable en 1714,3 m/s para el margen de temperaturas comprendido entre 27°C y 32°C. La velocidad sufre una variación de  $\pm 0,9$  m/s ( $\pm 0,06\%$ ) en el margen comprendido entre 19,5°C y 38°C respecto al valor de propagación estable. Teniendo en cuenta todo el margen de temperaturas estudiado, la desviación estándar es de 5,8 m/s.

Para concentraciones de 40% de glicerina, la velocidad de propagación media se sitúa en torno a 1720,6 m/s, manteniéndose estable en 1728,4 m/s para el margen de temperaturas comprendido entre 16°C y 25°C. Teniendo en cuenta todo el margen de temperaturas estudiado, la desviación estándar es de 8,9 m/s.

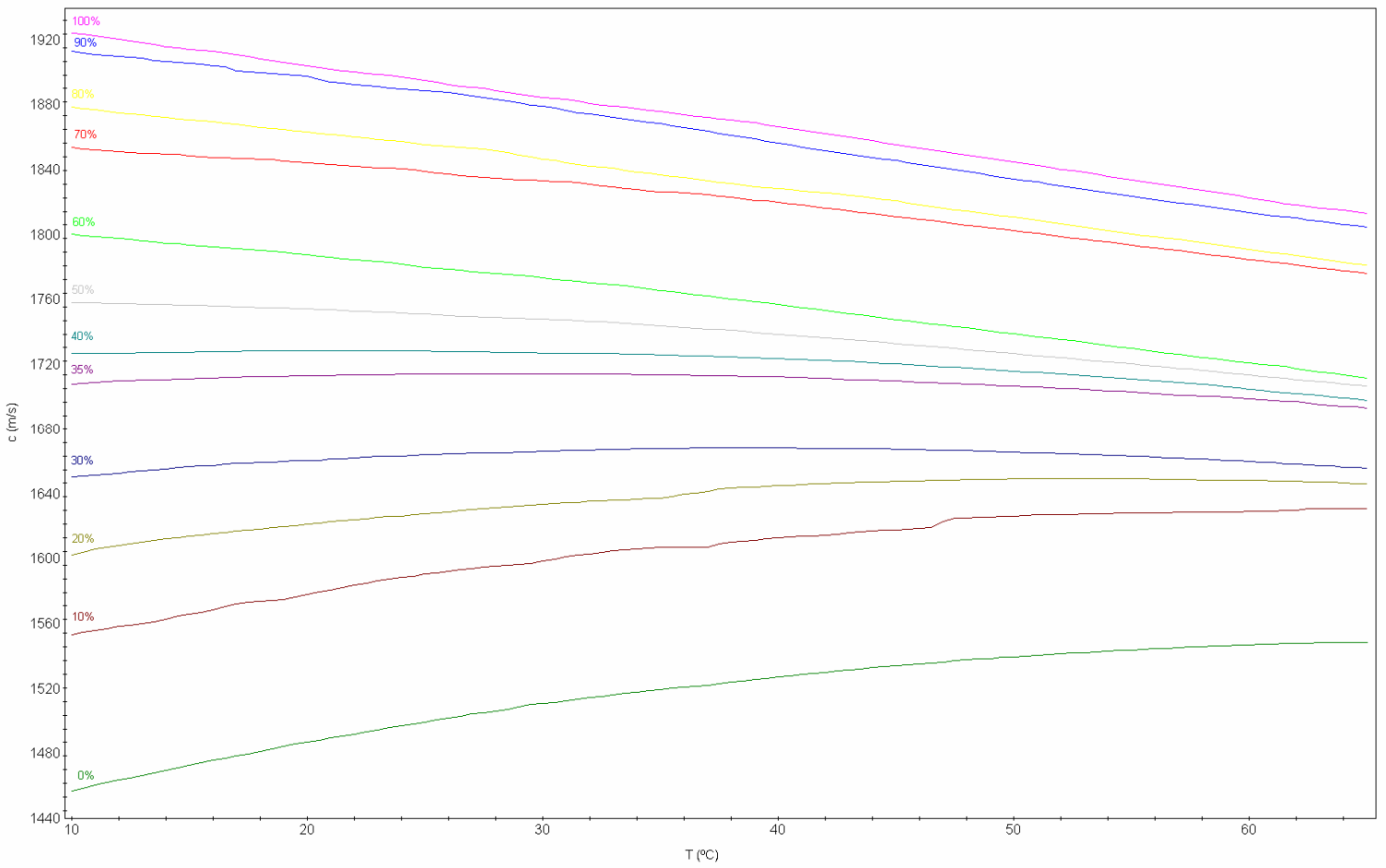


Figura 31: Curvas de propagación del sonido en diferentes concentraciones y temperaturas.

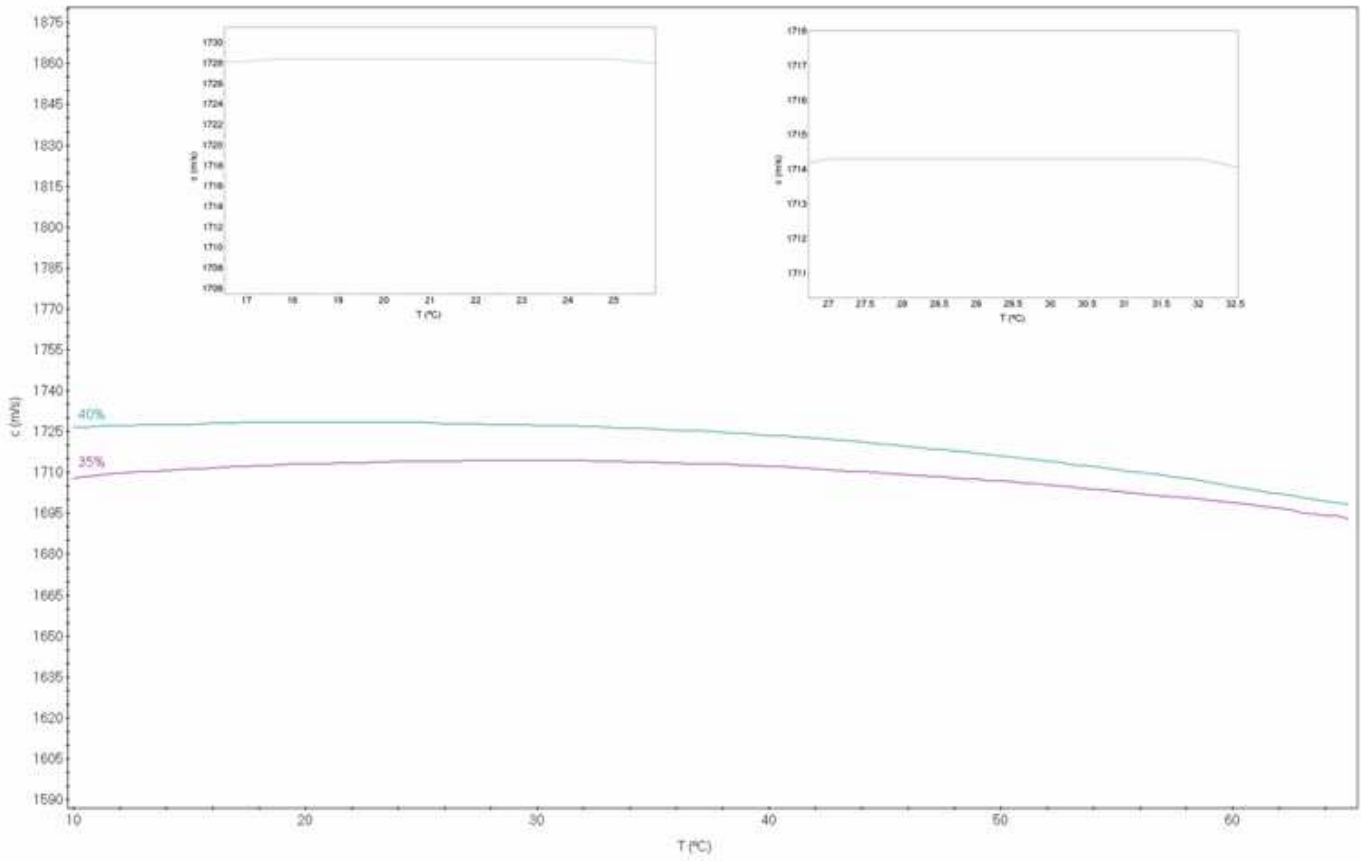


Figura 32: Detalle de las curvas de propagación del sonido en las concentraciones de 35 y 40 % de glicerina (región estable).

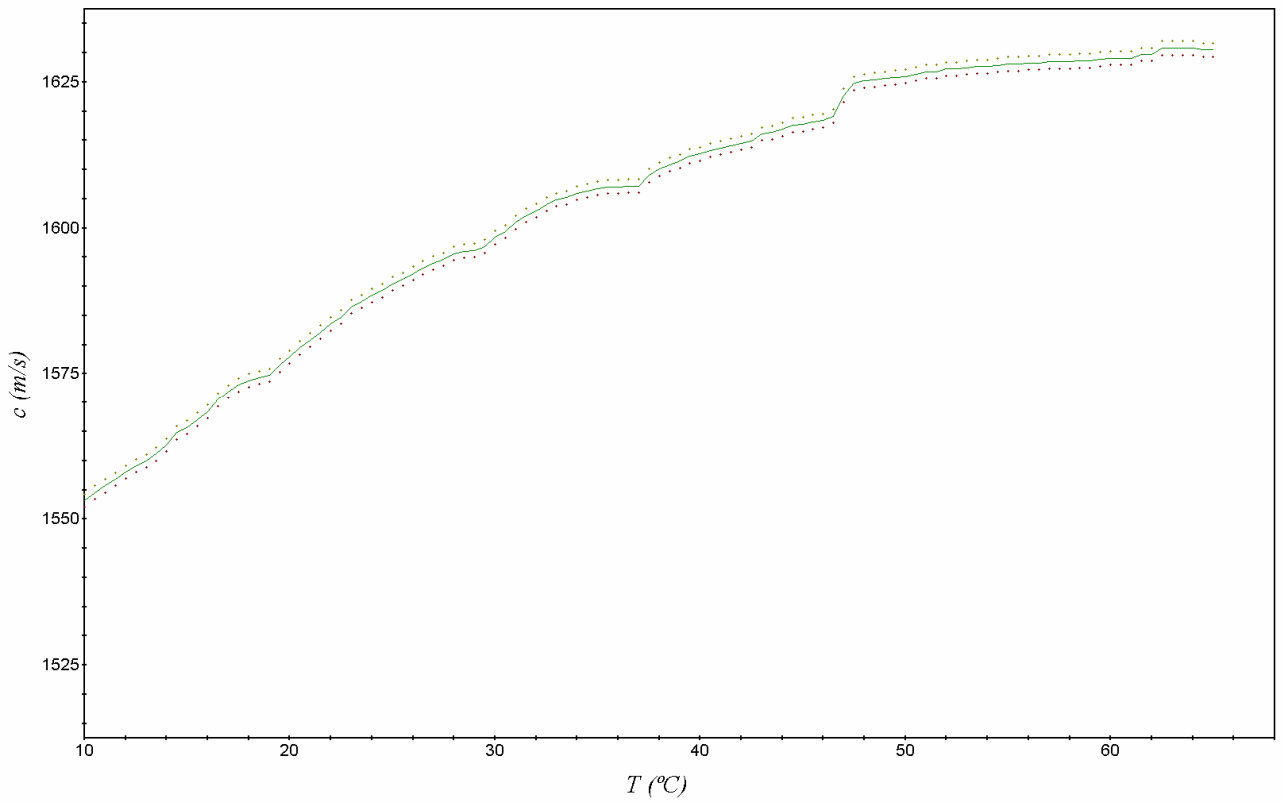
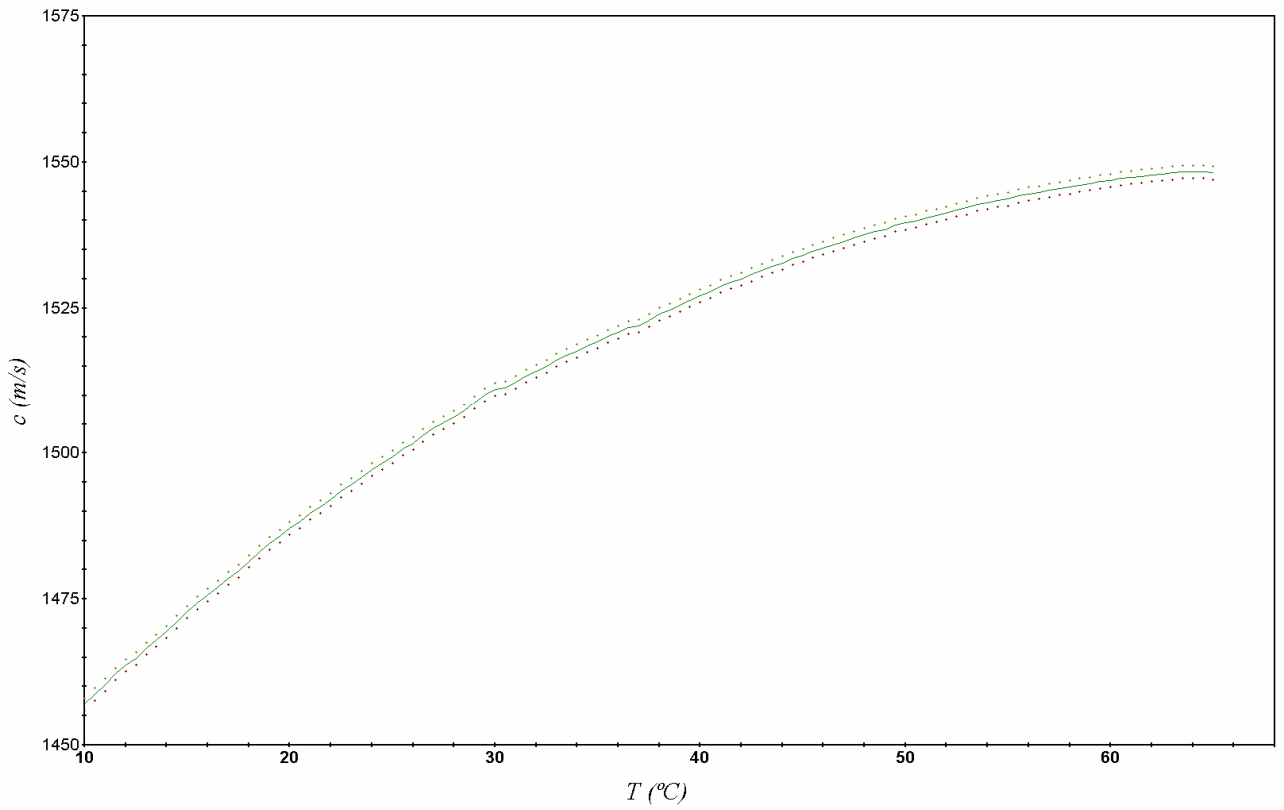


Figura 33: Curvas correspondientes a las concentraciones de 0% (superior) y 10% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.



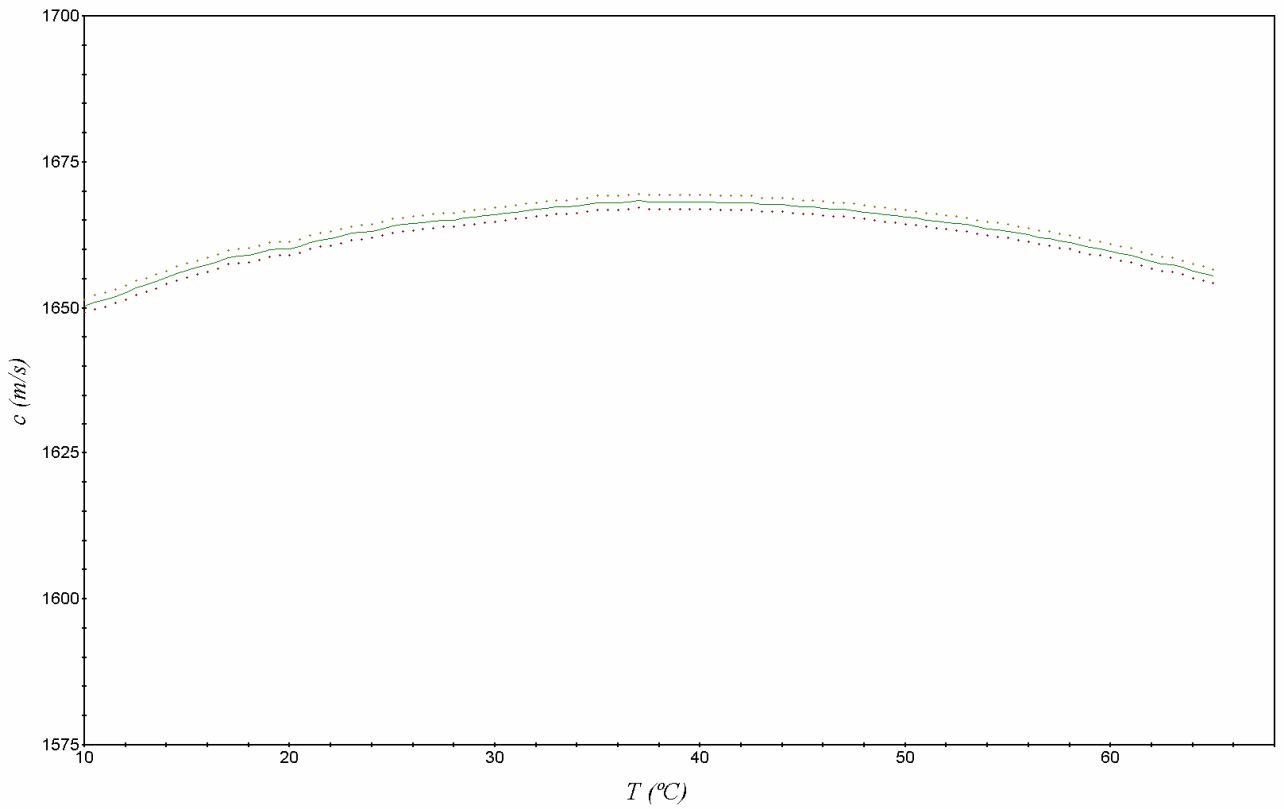
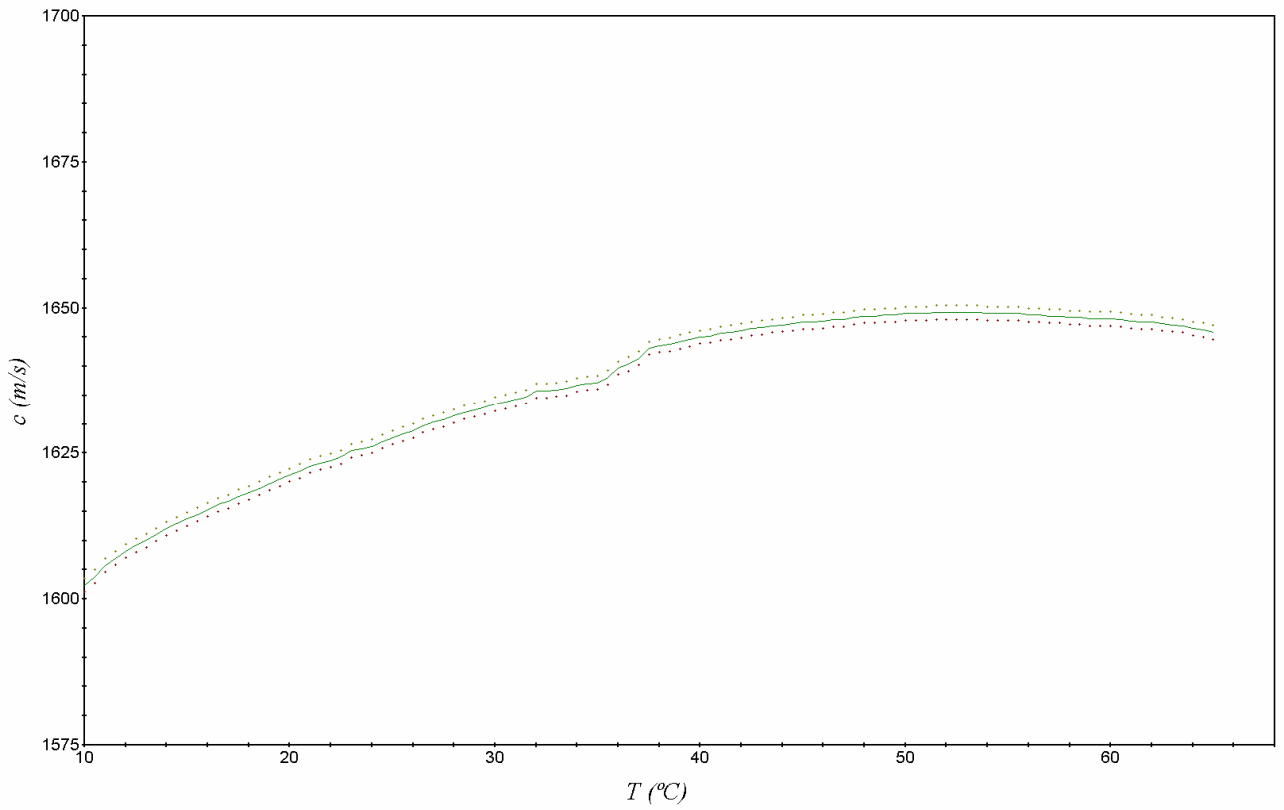


Figura 34: Curvas correspondientes a las concentraciones de 20% (superior) y 30% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.

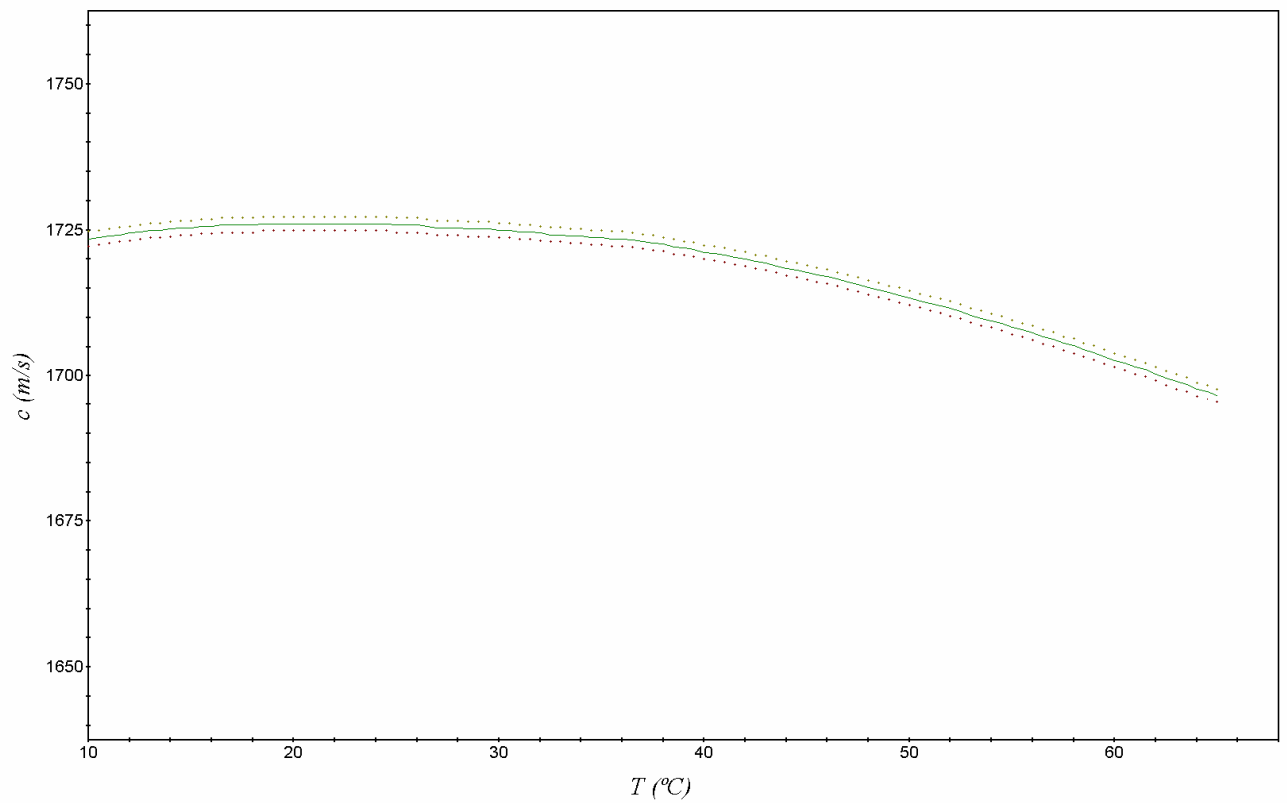
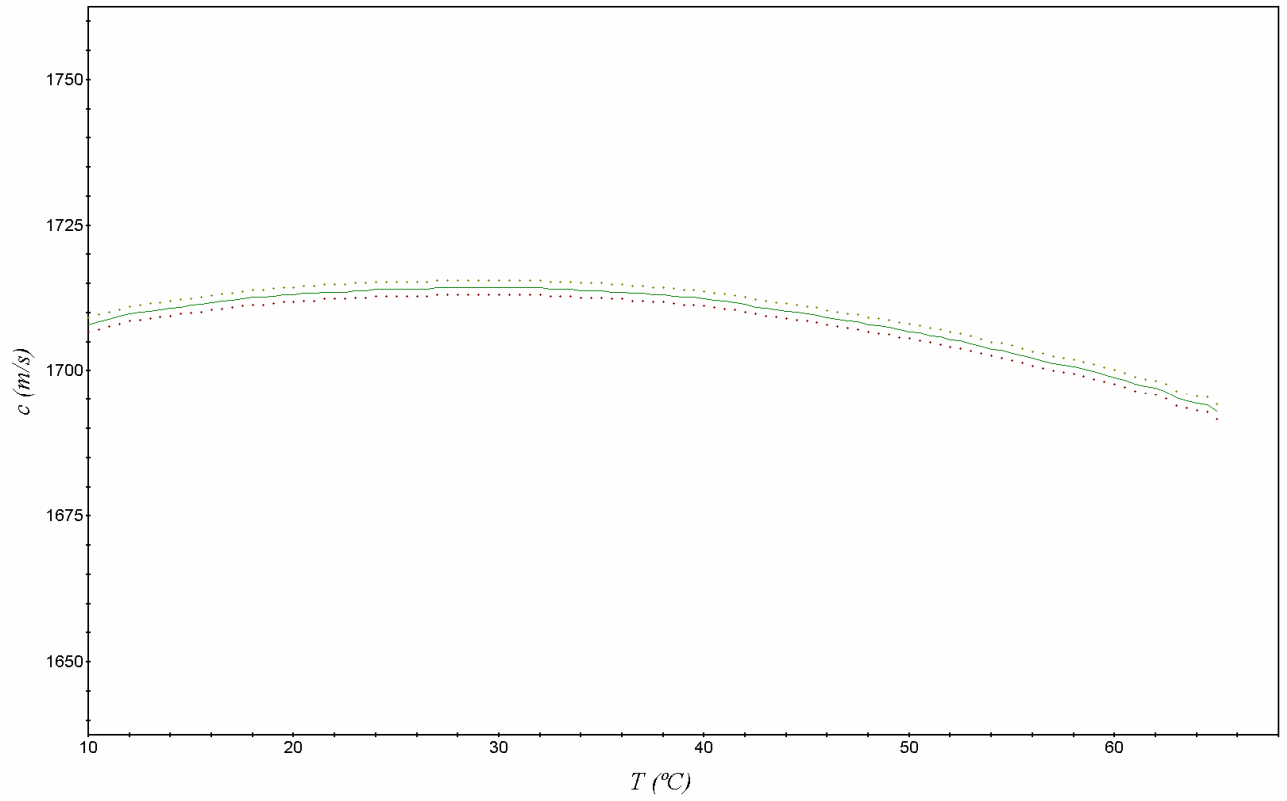


Figura 35: Curvas correspondientes a las concentraciones de 35% (superior) y 40% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.

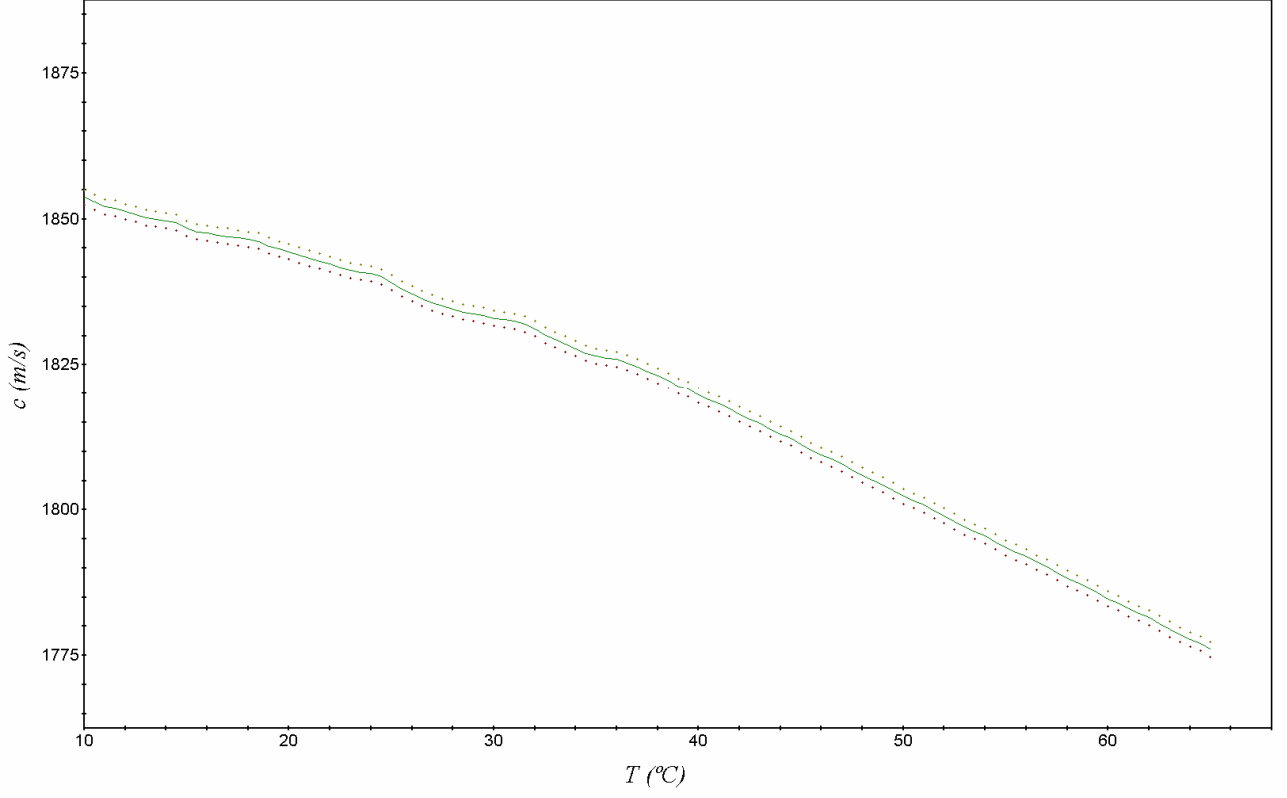
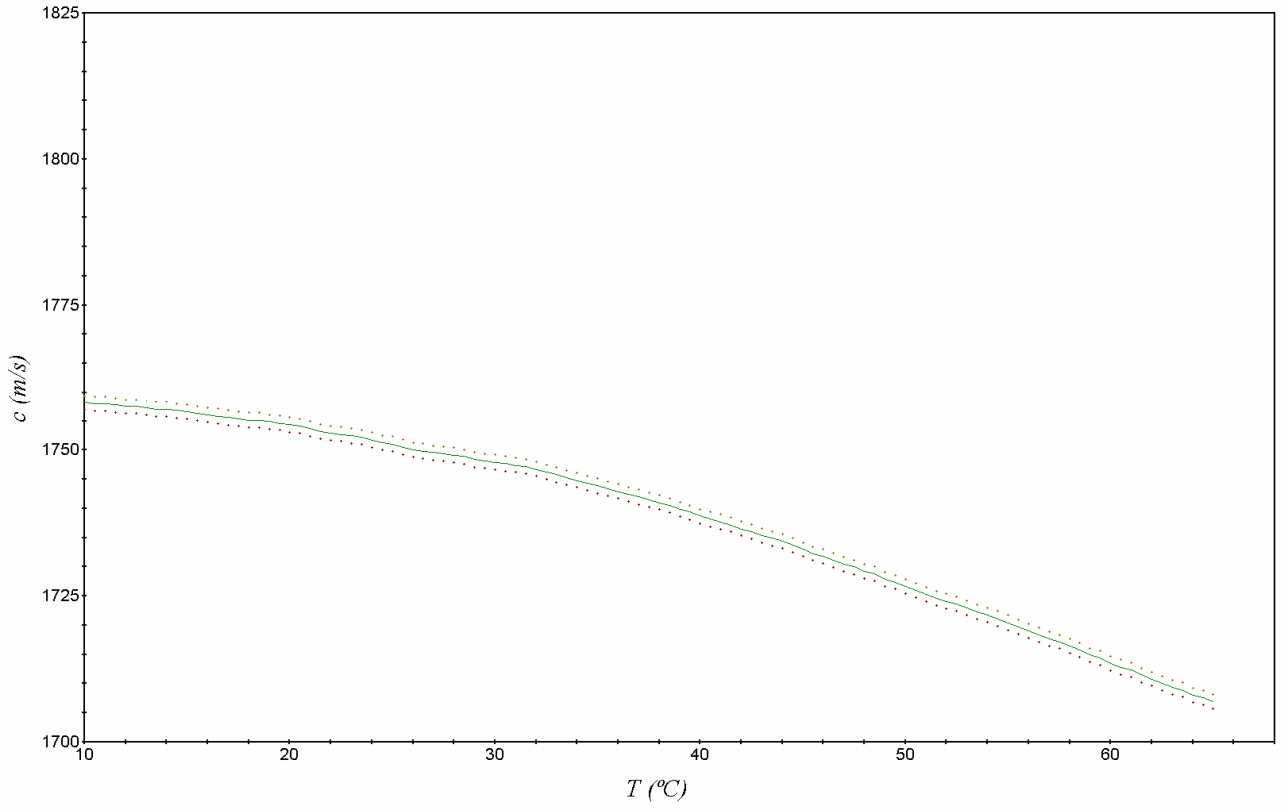


Figura 36: Curvas correspondientes a las concentraciones de 50% (superior) y 60% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.

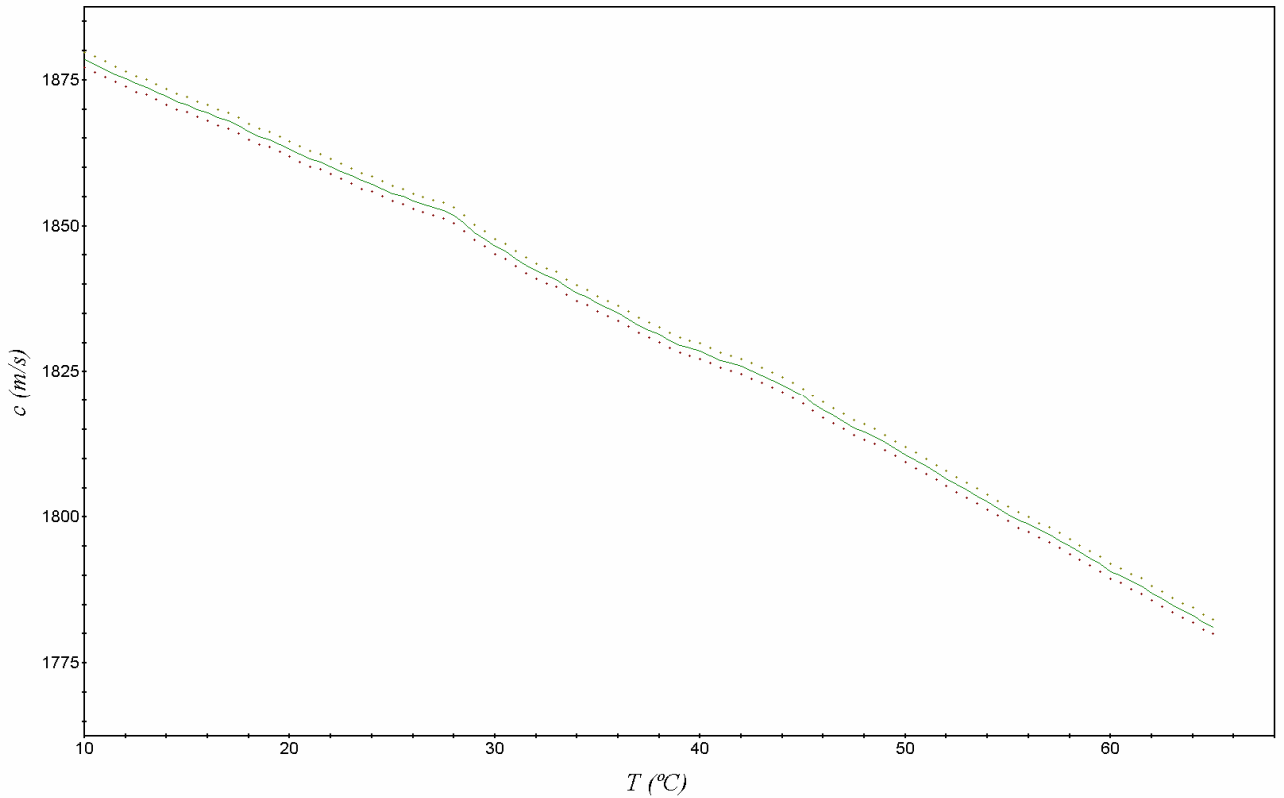
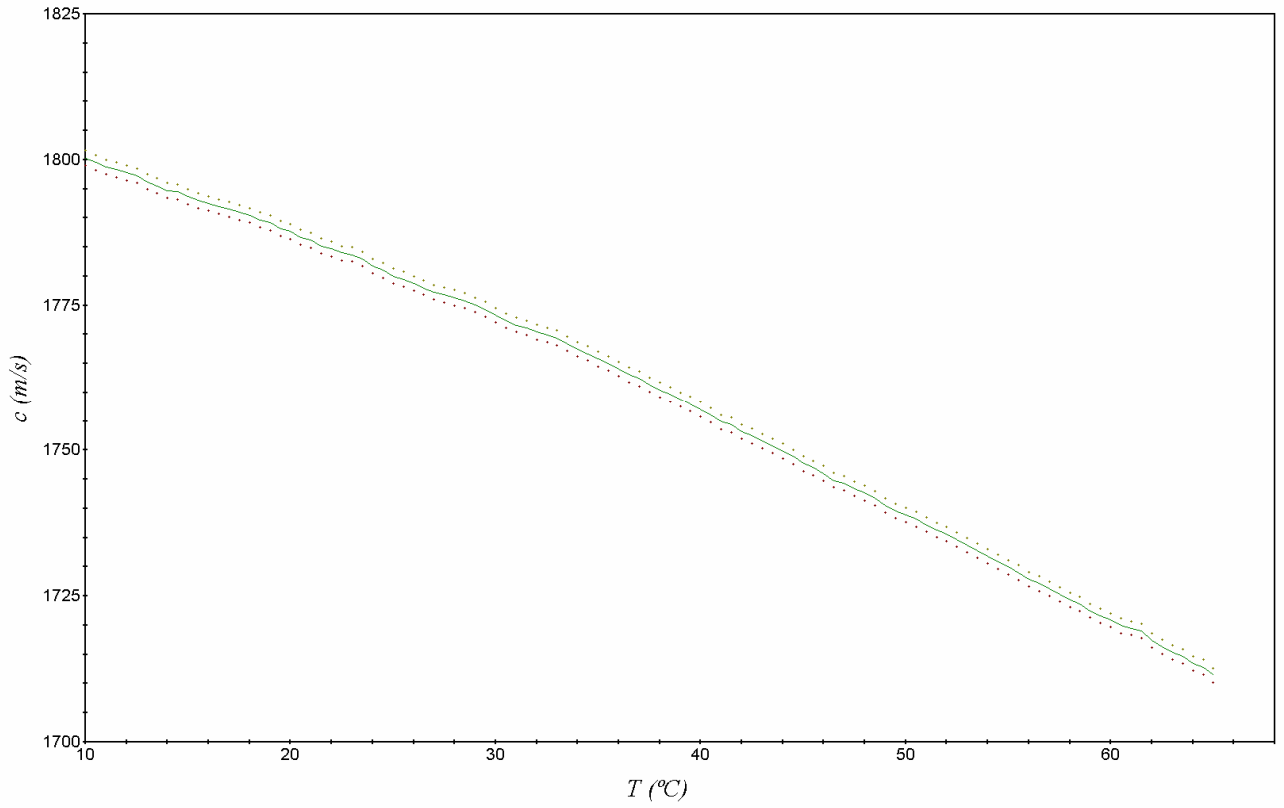


Figura 37: Curvas correspondientes a las concentraciones de 70% (superior) y 80% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.

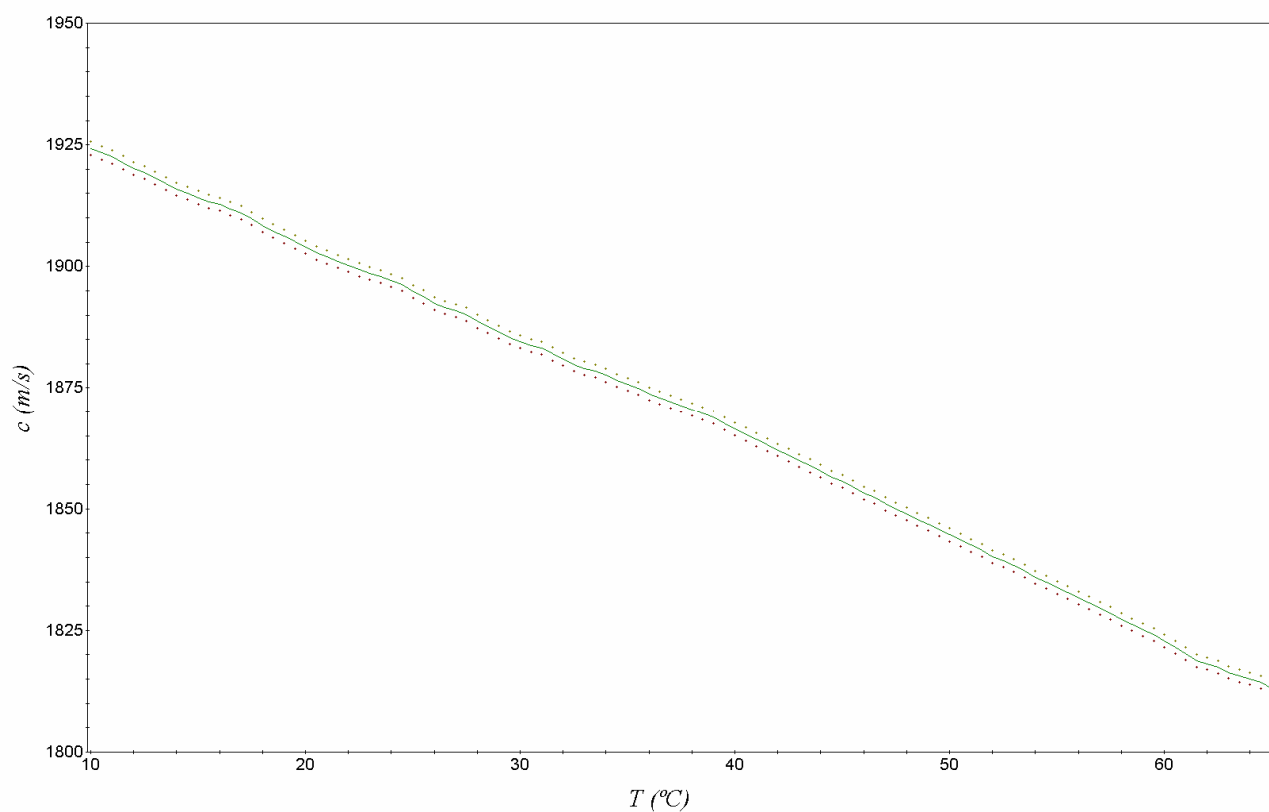
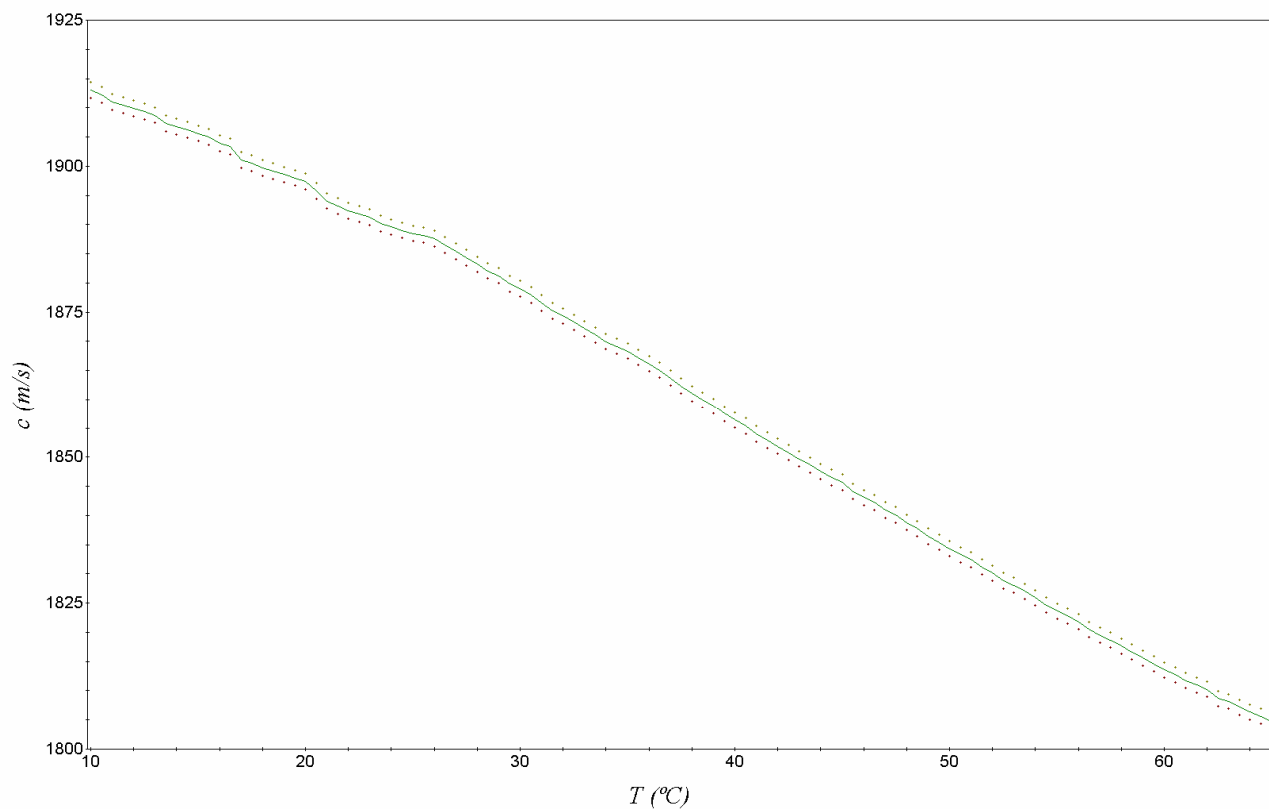


Figura 38: Curvas correspondientes a las concentraciones de 90% (superior) y 100% (inferior) de glicerina, considerando el error absoluto.

Del estudio del comportamiento de la densidad para diferentes concentraciones en el margen de temperaturas en las que la propagación se mantiene más estable, podemos determinar que a medida que aumenta la temperatura disminuye la densidad aunque estas variaciones son mínimas dentro del margen de temperaturas bajo estudio.

Concentración	Temperatura (°C)	Masa (g)	Volumen (dm <sup>3</sup> )	Densidad (g/dm <sup>3</sup> )	Módulo de compresibilidad K (kN/m <sup>2</sup> )
<b>100%</b>	15	393,3	0,314	1252,7	4,59·10 <sup>6</sup>
	20	392,9	0,314	1251,43	4,54·10 <sup>6</sup>
	25	392,8	0,314	1251,11	4,49·10 <sup>6</sup>
	30	392,7	0,314	1250,79	4,44·10 <sup>6</sup>
<b>70%</b>	15	317,3	0,279	1135,02	3,65·10 <sup>6</sup>
	20	317,1	0,279	1134,3	3,62·10 <sup>6</sup>
	25	316,6	0,279	1132,52	3,59·10 <sup>6</sup>
	30	316,5	0,279	1132,16	3,56·10 <sup>6</sup>
<b>50%</b>	15	329	0,292	1124,95	3,47·10 <sup>6</sup>
	20	329,3	0,292	1125,98	3,46·10 <sup>6</sup>
	25	328,9	0,292	1124,61	3,45·10 <sup>6</sup>
	30	328,7	0,292	1123,92	3,43·10 <sup>6</sup>
<b>45%</b>	15	327,7	0,292	1120,51	3,52·10 <sup>6</sup>
	20	327,1	0,292	1118,45	3,51·10 <sup>6</sup>
	25	326,8	0,292	1117,43	3,50·10 <sup>6</sup>
	30	326,7	0,292	1117,09	3,49·10 <sup>6</sup>
<b>40%</b>	15	325,8	0,297	1097,86	3,28·10 <sup>6</sup>
	20	325,7	0,297	1097,53	3,28·10 <sup>6</sup>
	25	325,5	0,297	1096,85	3,28·10 <sup>6</sup>
	30	325,8	0,297	1097,864	3,27·10 <sup>6</sup>
<b>35%</b>	15	320,3	0,297	1079,33	3,16·10 <sup>6</sup>
	20	320,2	0,297	1078,99	3,17·10 <sup>6</sup>
	25	320,1	0,297	1078,66	3,17·10 <sup>6</sup>
	30	319,9	0,297	1077,98	3,17·10 <sup>6</sup>
<b>30%</b>	15	313,4	0,292	1071,61	2,94·10 <sup>6</sup>
	20	313,3	0,292	1071,27	2,95·10 <sup>6</sup>
	25	313,1	0,292	1070,58	2,96·10 <sup>6</sup>
	30	313,2	0,292	1070,93	2,97·10 <sup>6</sup>

Tabla 6: Cálculo del módulo de compresibilidad K de diferentes concentraciones de glicerina y agua

En las diferentes concentraciones de agua-glicerina se observa como a medida que la concentración de glicerina aumenta en la solución, también lo hace la densidad y por tanto el módulo de compresibilidad o coeficiente volumétrico de elasticidad, reduciéndose el coeficiente de compresibilidad, lo que conlleva un aumento de la velocidad de propagación del sonido. Este hecho pone de manifiesto que la velocidad del sonido es mayor cuanto más elástico es el medio. En nuestro estudio hemos evidenciado que a medida que aumentamos la elasticidad del medio, aumentando la concentración de glicerina frente a la de agua, la velocidad de propagación aumenta en la misma proporción.

Atendiendo a los resultados expuestos en la tabla anterior, la elasticidad de la glicerina disminuye con la temperatura, lo cual también se traduce en una reducción de la velocidad de propagación a medida que ésta aumenta.

#### 5.4. Conclusiones

En la propagación a través de la glicerina la elasticidad es la causante de la rapidez de la velocidad de propagación del sonido frente al agua. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura y disminuye el módulo de compresibilidad y por tanto su elasticidad, la velocidad va reduciéndose, teniendo un comportamiento ante la temperatura inverso al del agua. En la glicerina el aumento de temperatura conlleva una reducción considerable de su viscosidad, lo que favorece principalmente a la reducción de la velocidad de propagación. La zona de especial interés por el comportamiento de la velocidad independiente de la temperatura (casi plano), se encuentra en torno al 35-40% de glicerina y en el en el rango de temperaturas de 16 a 32 °C, es decir, alrededor de la temperatura ambiente y por tanto la temperatura a la que se encuentra trabajando el resonador acústico.

Encontrar una concentración en la que la velocidad de propagación no dependa de la temperatura, al menos en un margen relativamente amplio, supone una gran contribución a la hora de caracterizar y estudiar resonadores acústicos. El empleo de resonadores de ultrasonidos provoca un aumento de la temperatura del medio que atraviesan y que es proporcional a la potencia acústica utilizada. En el caso de medios muy viscosos como la glicerina, este aumento de temperatura puede llegar a ser considerablemente elevado lo que imposibilita el estudio del medio en cuestión.

En el estudio de los modos propios de un resonador tiene gran influencia la velocidad de propagación del medio bajo estudio y ésta es consecuencia de su composición y de su temperatura. El margen de temperaturas de propagación estable expuesto en este estudio para las concentraciones de 35-40% de glicerina, permite el estudio de la onda estacionaria producida entre el emisor y el receptor de un resonador acústico sin apenas variación dentro de dicho margen de temperaturas. Estos modos propios pasan a depender únicamente de la frecuencia y del nivel de presión sonora, lo que facilita su observación y análisis. Los resultados obtenidos<sup>1</sup> evidencian la estabilidad de los modos propios para la solución de agua y glicerina (40%).

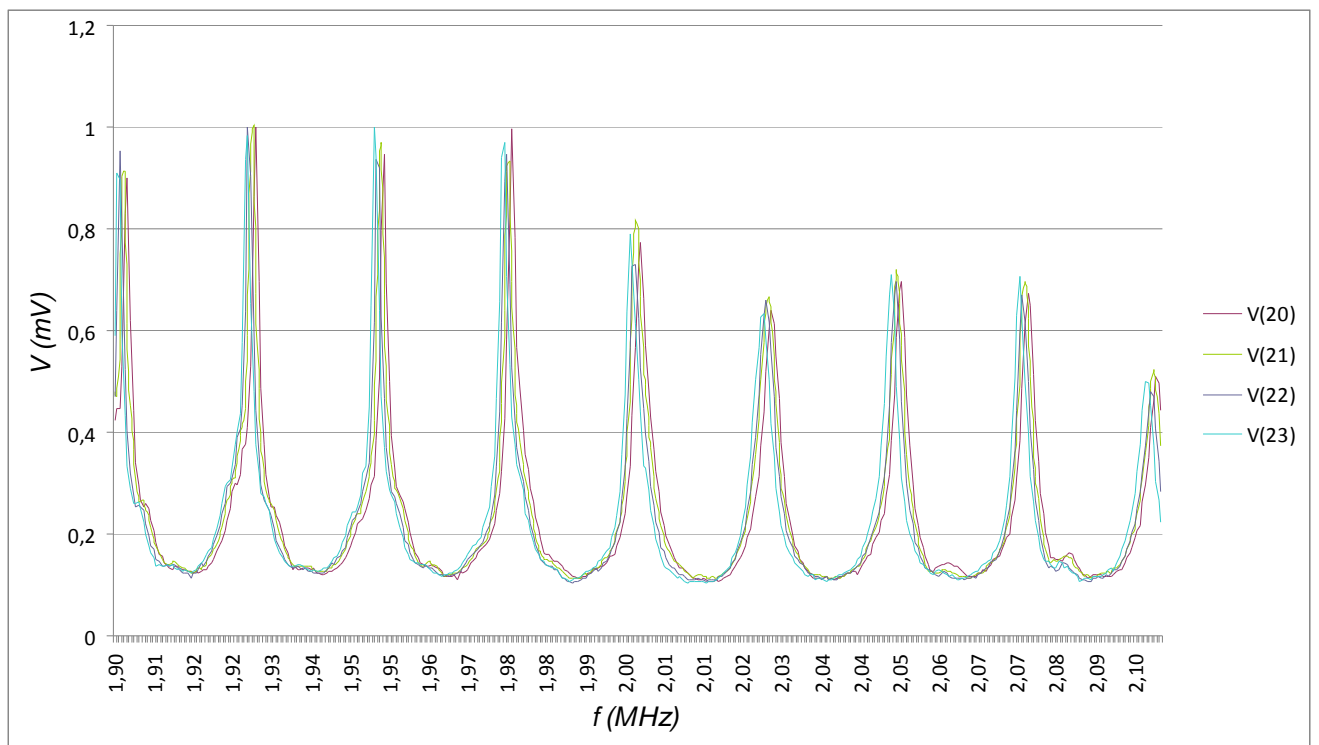


Figura 39: Modos propios para la concentración de agua y glicerina (40%) para las temperaturas de 20°C, 21°C, 23°C y 24°C.

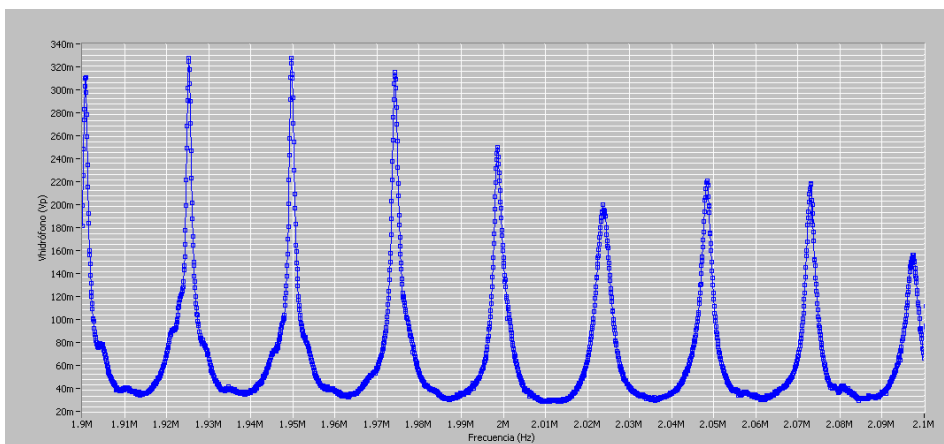
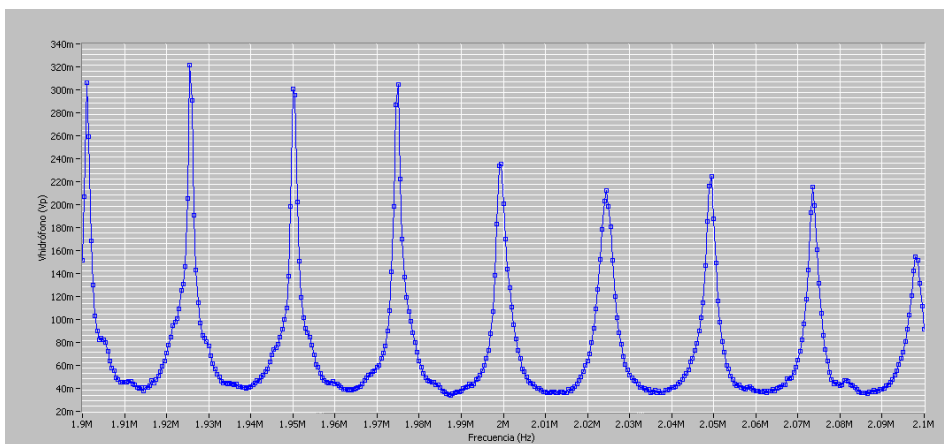
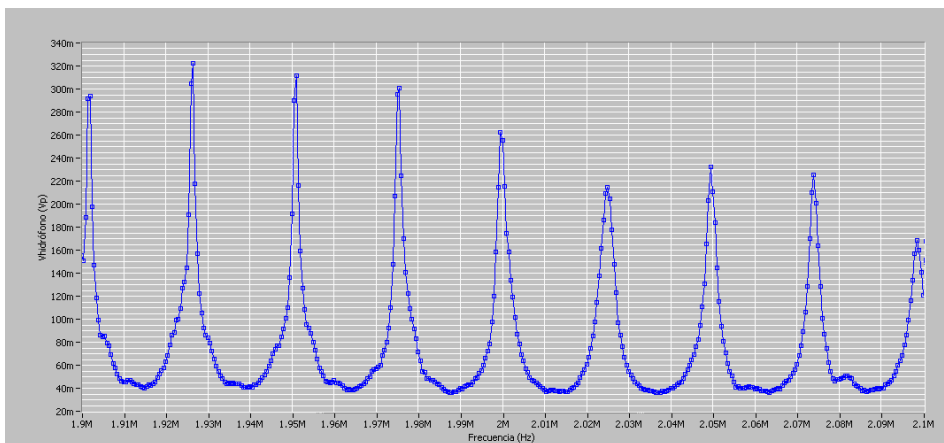
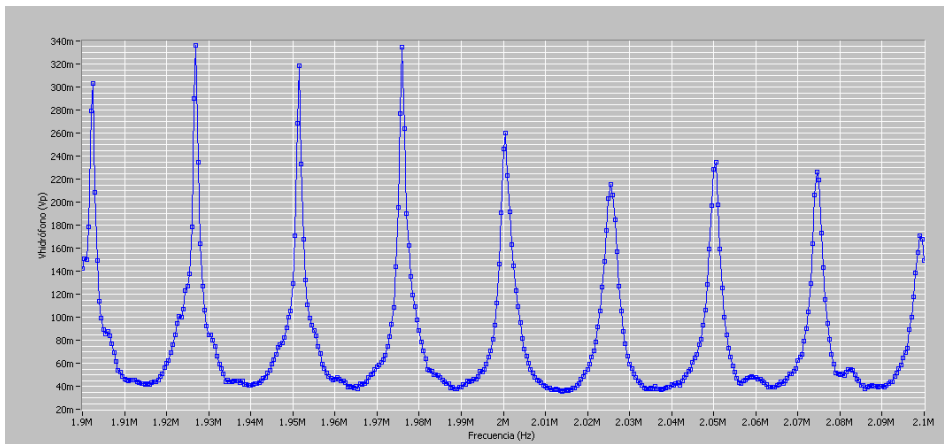


Figura 40: Modos propios para la concentración de agua y glicerina (40%) para las temperaturas de 20°C, 21°C, 23°C y 24°C.



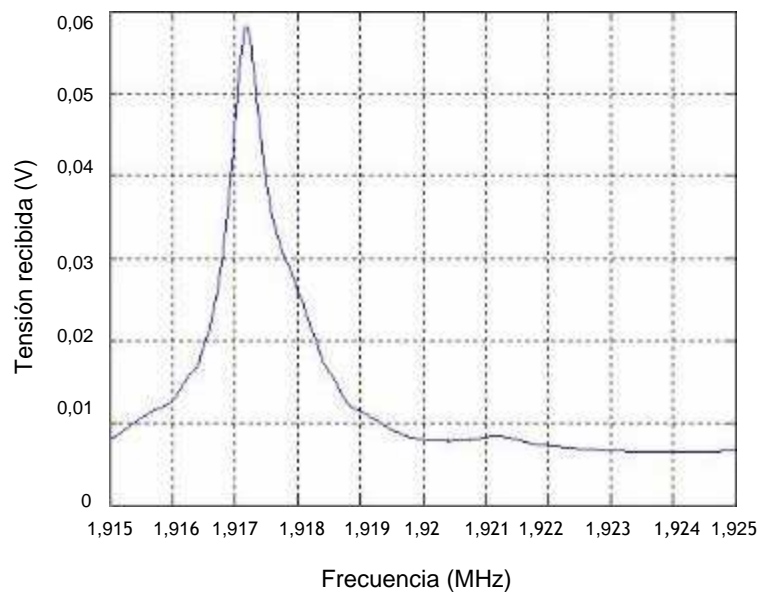
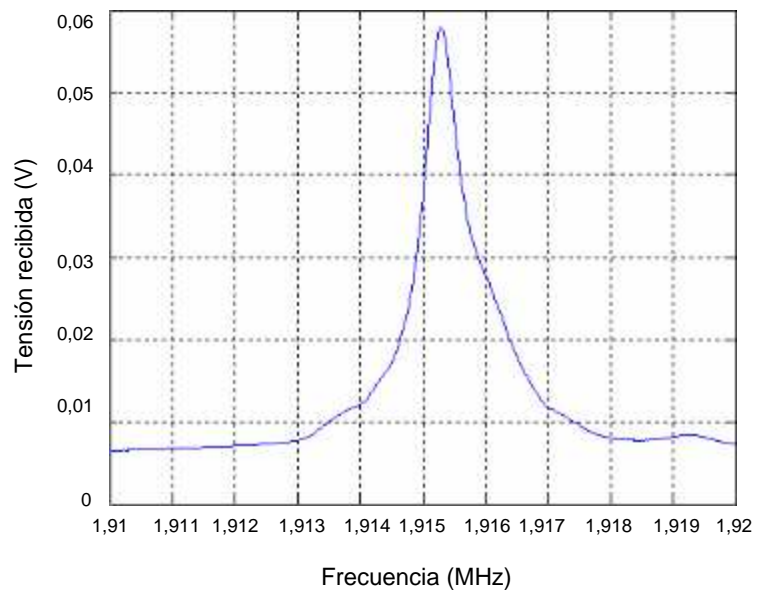
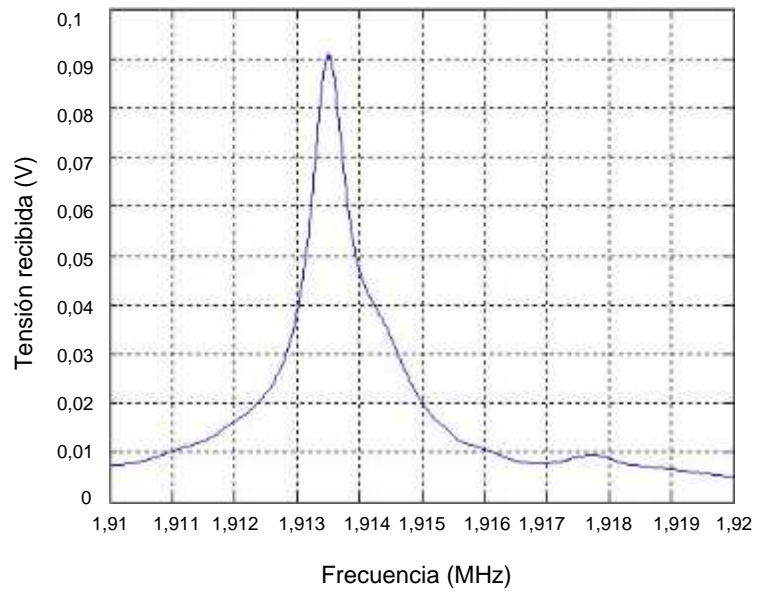


Figura 41: Modos propios para agua a las temperaturas de 20°C, 20,5°C y 21°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)

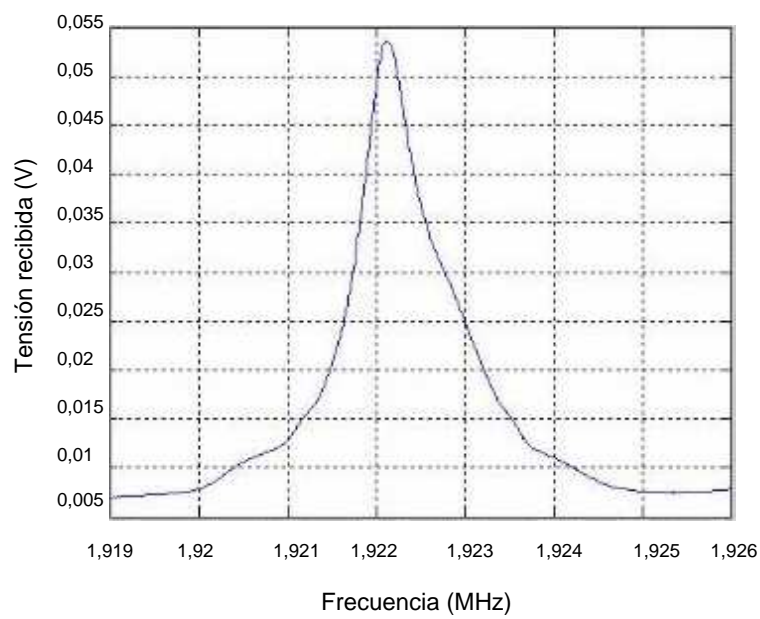
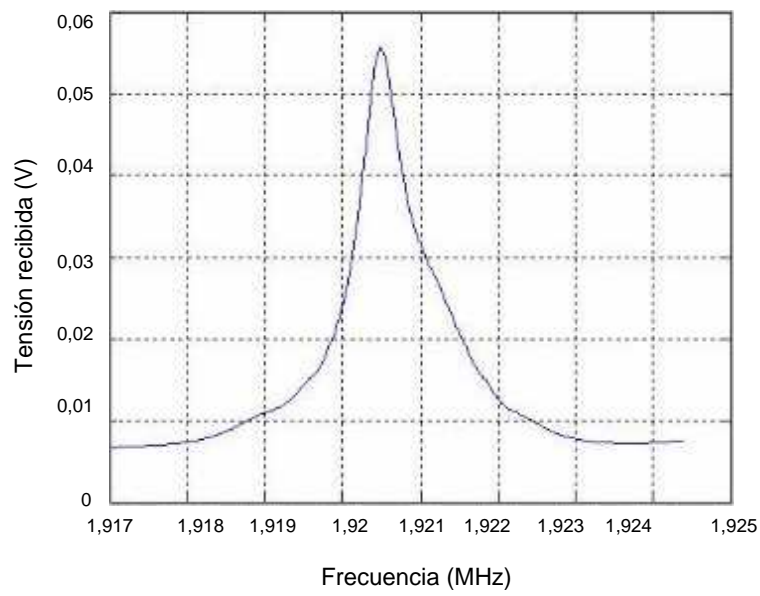
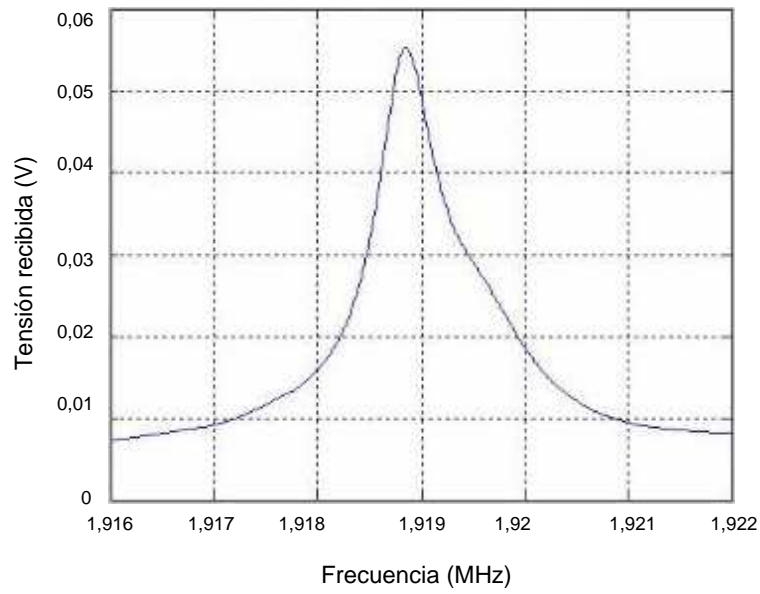


Figura 42: Modos propios de la cavidad para agua a las temperaturas de 21,5°C, 22°C y 22,5°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)

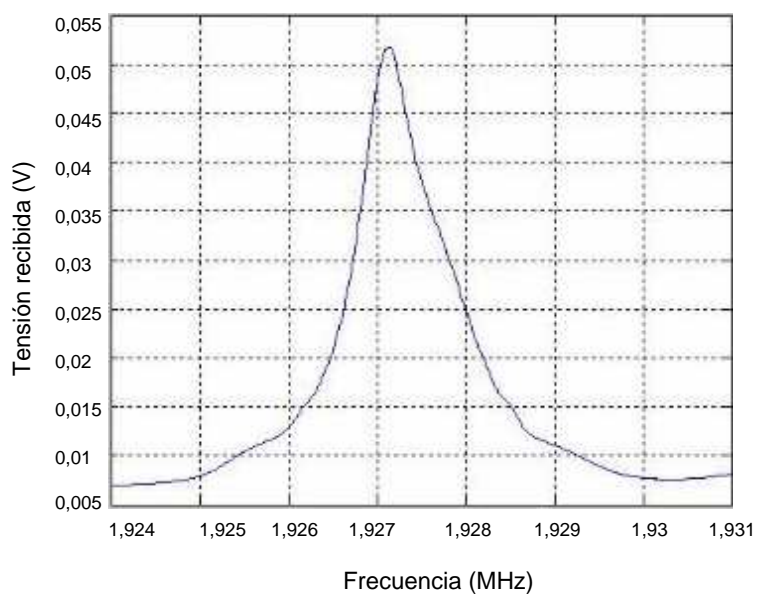
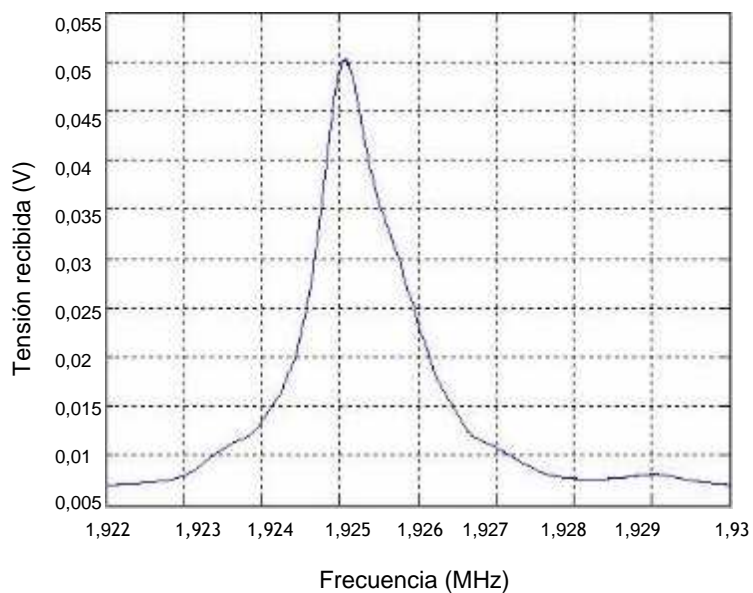
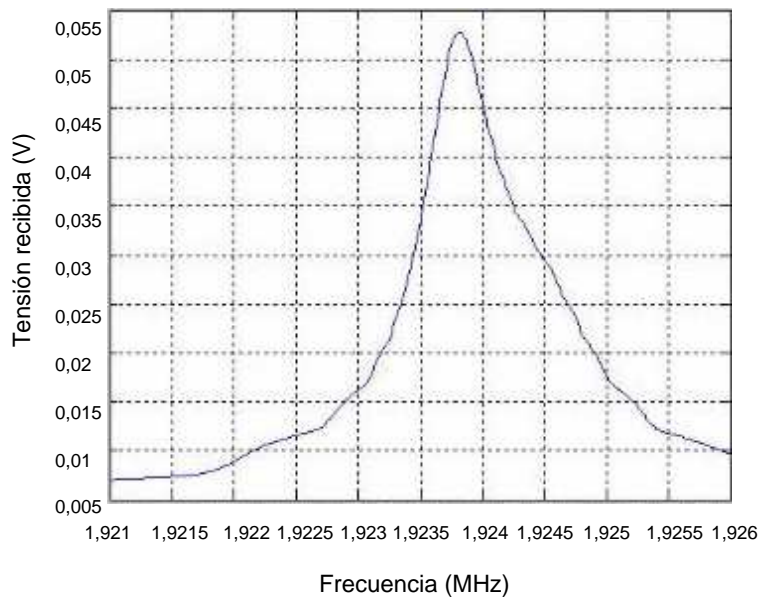
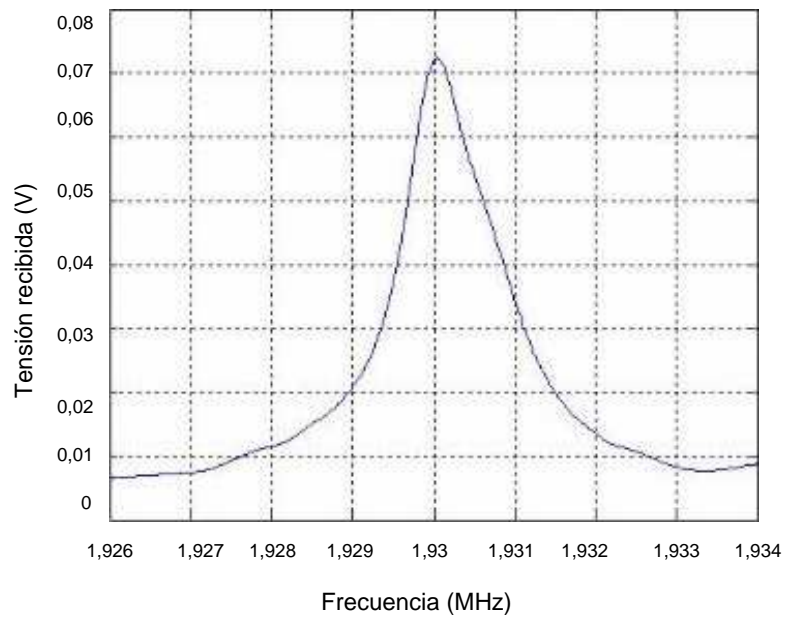
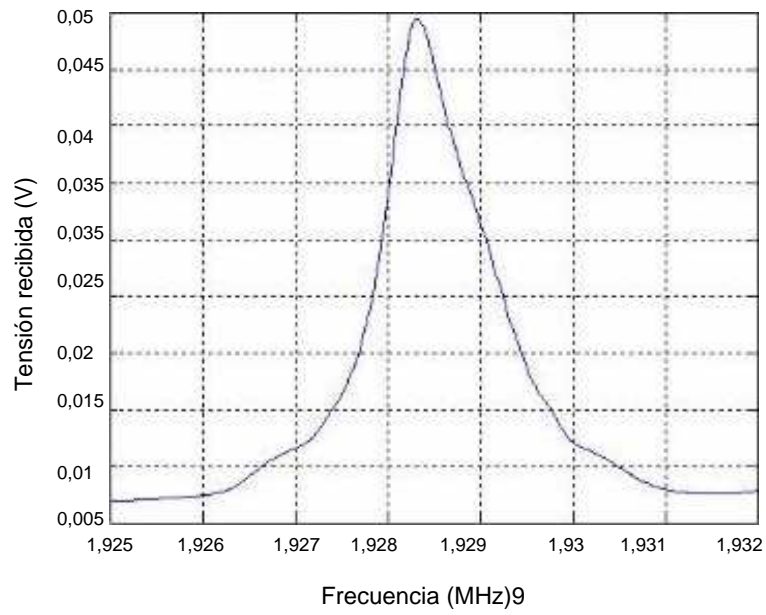


Figura 43: Modos propios de la cavidad para agua a las temperaturas de 23°C, 23,5°C y 24°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)



*Figura 44: Modos propios de la cavidad para agua a las temperaturas de 24,5°C y 25°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)*

Se observa que empleando agua pura los modos también varían con la temperatura, aunque esta variación es mucho menor que en la glicerina pura, ya que el agua se calienta mucho menos con el paso del haz ultrasónico.

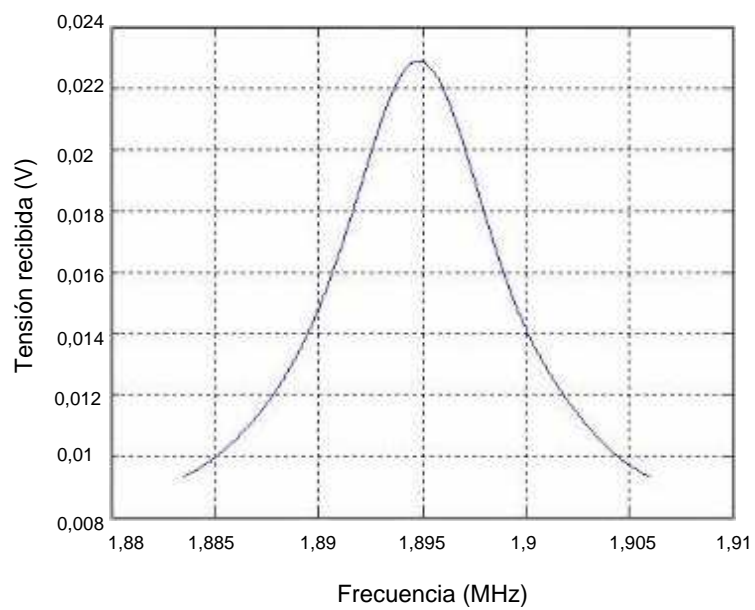
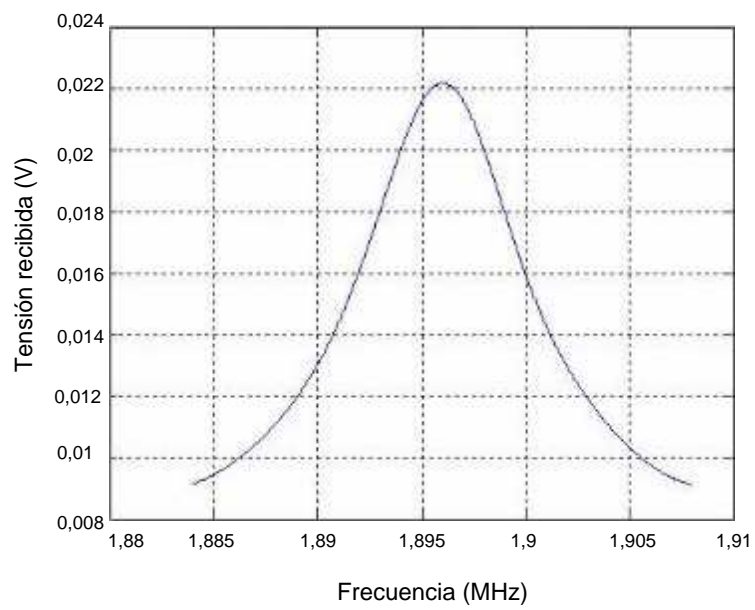
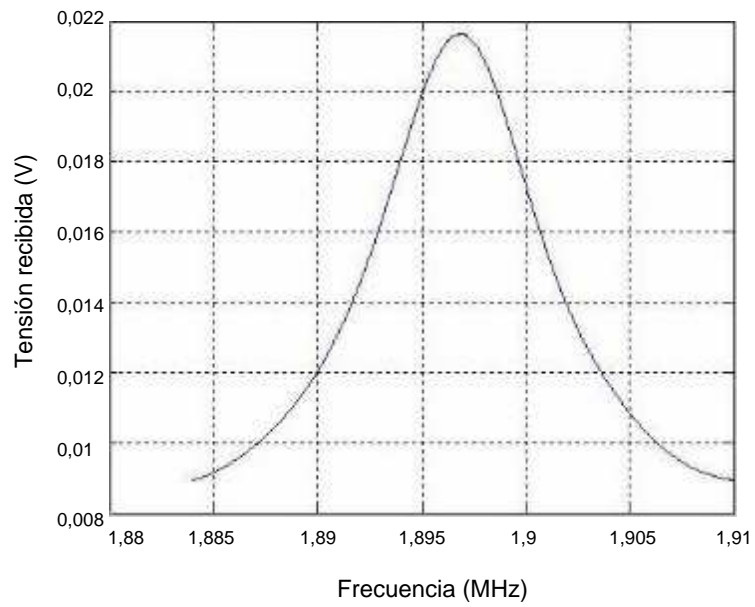


Figura 45: Modos propios de la cavidad para glicerina pura a las temperaturas de 20°C, 20,5°C y 21°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)

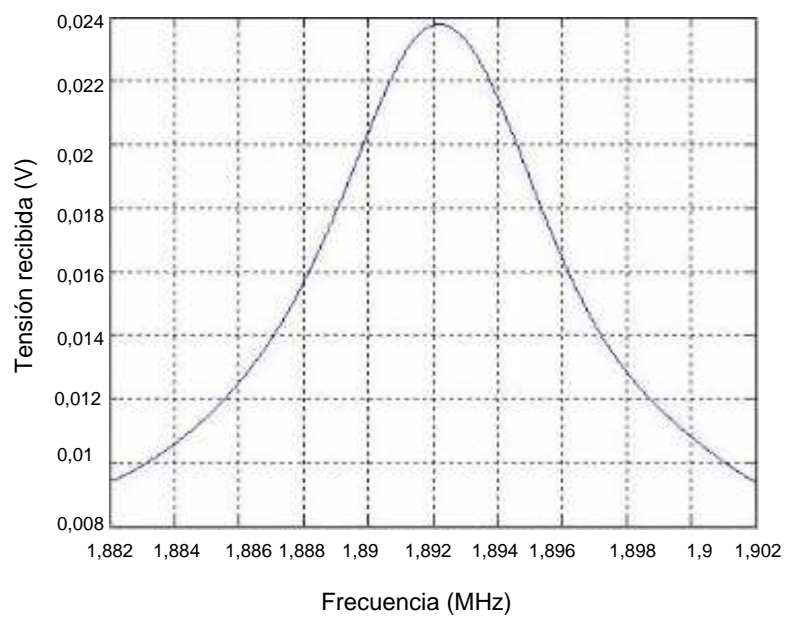
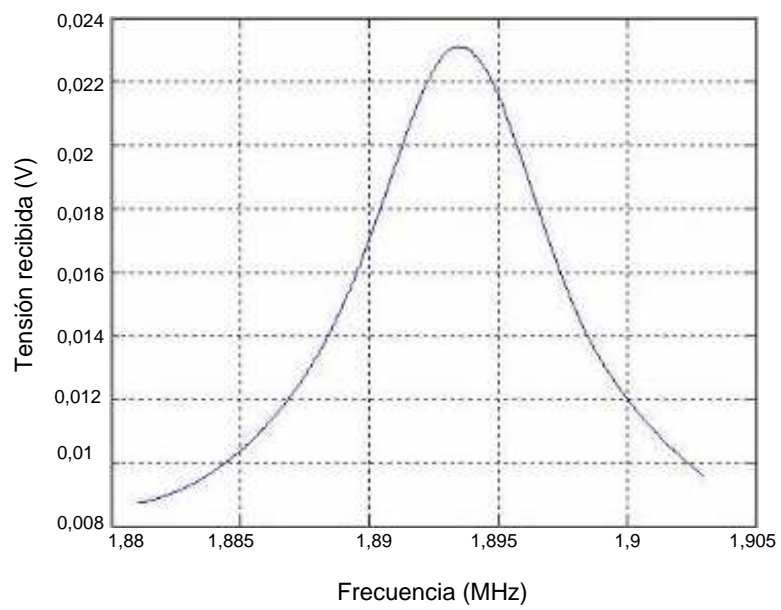
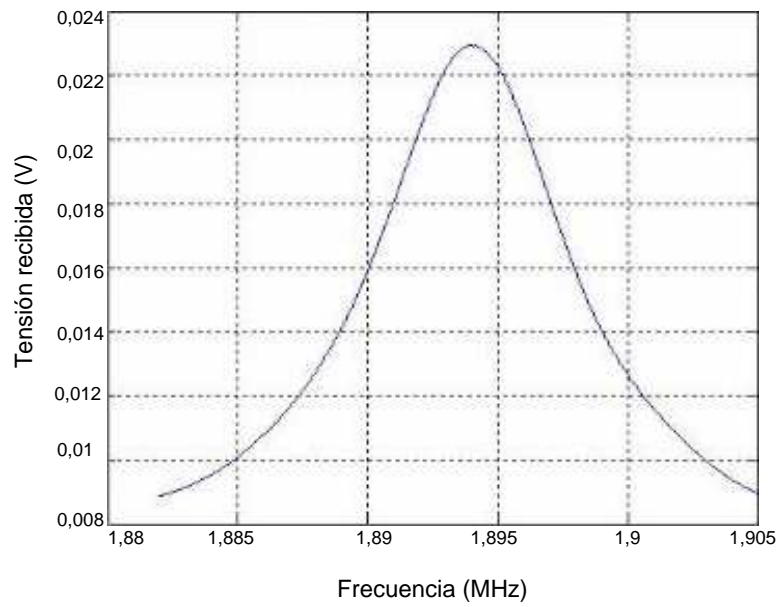


Figura 46: Modos propios de la cavidad para glicerina pura a las temperaturas de 21,5°C, 22°C y 22,5°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)

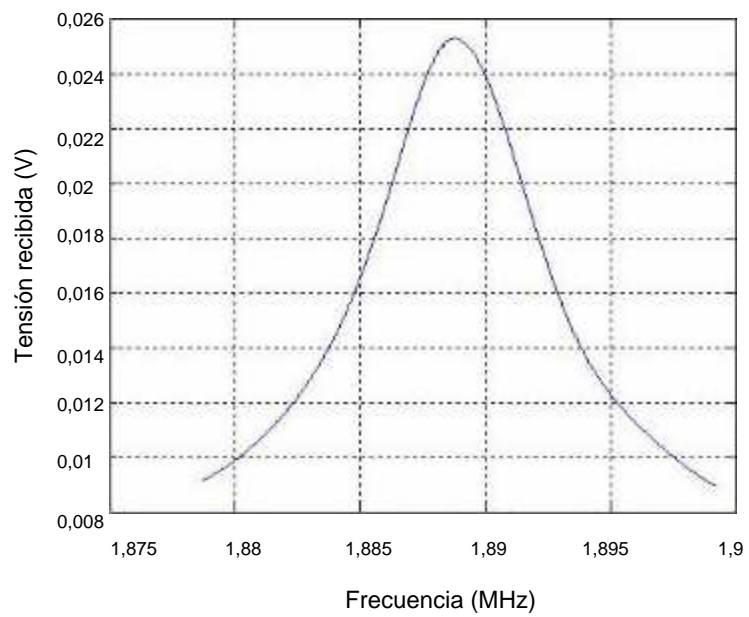
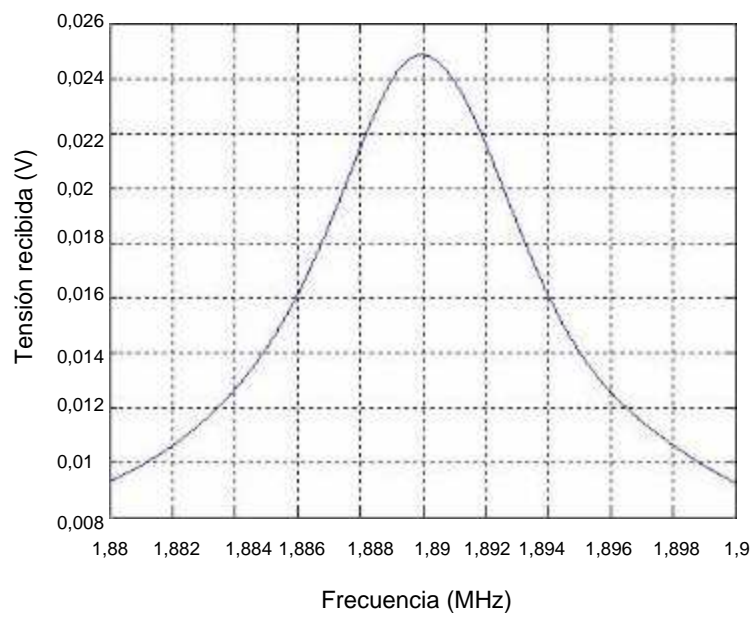
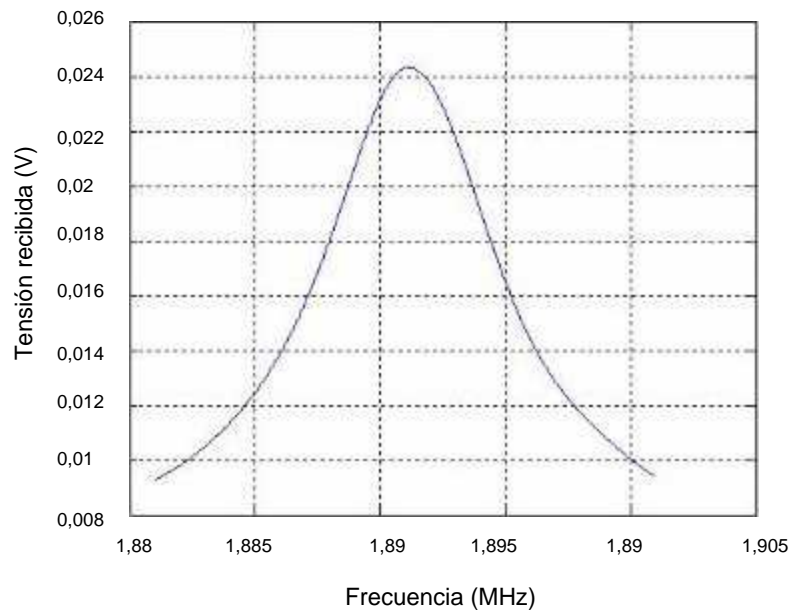


Figura 47: Modos propios de la cavidad para glicerina pura a las temperaturas de 23°C, 23,5°C y 24°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)

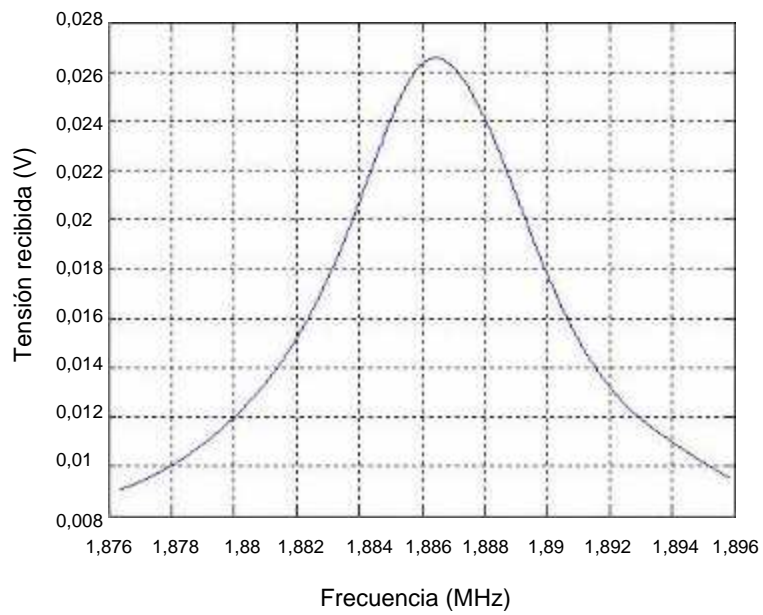
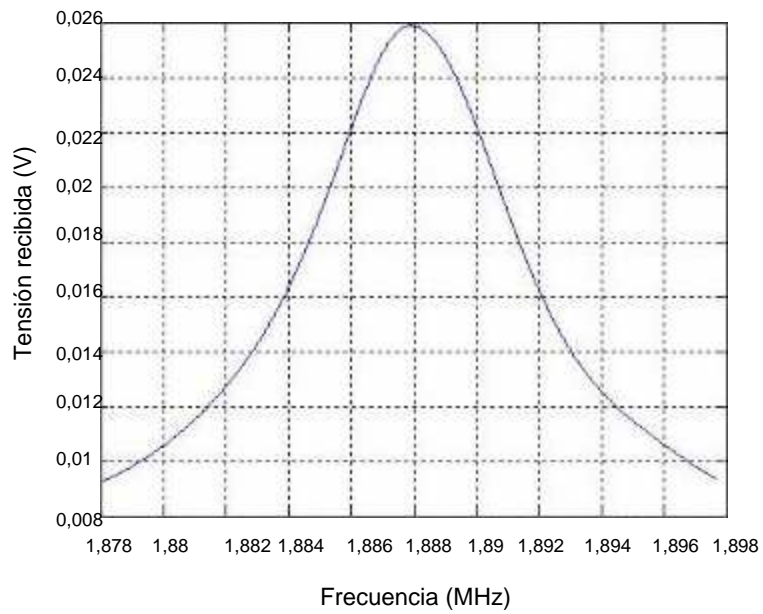


Figura 48: Modos propios de la cavidad para glicerina pura a las temperaturas de 24,5°C y 25°C. (Florian Huchede EPSG-UPV, 2011)



En el apartado 2.5 se comentó que en la actualidad está tomando un gran protagonismo la investigación para el tratamiento médico de determinados tipos de cáncer y otras enfermedades mediante ultrasonidos. El estudio del comportamiento de los diferentes tejidos humanos ante el paso de las ondas ultrasónicas es el punto de partida para futuras investigaciones médicas.

La glicerina, en diferentes concentraciones, forma parte de la composición de las grasas de los diferentes tejidos humanos. Las diferentes concentraciones de glicerina y agua empleadas en este estudio se pueden asimilar, a efectos de estudio, a los diferentes tejidos que se tratan con la técnica no invasiva de aplicación de ultrasonidos, permitiendo el conocimiento del comportamiento de los mismos ante estas exposiciones, hecho que puede contribuir a la realización de futuros ensayos médicos. A continuación se muestran las velocidades de propagación y las densidades de los principales tejidos humanos, comparándolos con los de las diferentes concentraciones de agua y glicerina (a 20 °C).

Tejido	Velocidad de propagación (m/s)	Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )
Grasa	1.470	0,97
Músculo	1.568	1,04
Hueso	3.600	1,7
Glicerina pura	1.920	1,261
Glicerina 80%	1.863,2	1,208
Glicerina 60%	1.844,4	1,153
Glicerina 40%	1.726,1	1,099
Glicerina 20%	1.621,3	1,046
Glicerina 10%	1.577,8	1,022
Agua pura	1.480	0,998

*Tabla 7: Velocidades de propagación y densidades de diferentes tejidos humanos y concentraciones agua-glicerina*

## BIBLIOGRAFÍA

- Kuttruff H., Ultrasonics: Fundamentals and Applications. Ed. Elsevier 1991.
- Cheeke J. Fundamentals and Applications Of Ultrasonic Waves. Ed. CRC 2002.
- Ultrasonic technical transducers notes-Olympus 2011.
- Práctica de ultrasonidos: aplicación de la técnica eco-impulso, del departamento de física aplicada de la Escuela Politécnica Superior de Gandia.
- E.A. Both. Master thesis "Feasibility study of temperature estimation based on nonlinear acoustics". 2010
- Huchede Florian. Étude dynamique de fluides dans un résonateur acoustique.
- Motilla Plaza E. Generación Paramétrica de Sonido en un resonador ultrasónico, TFC Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- Sánchez-Morcillo, J. Martínez-Mora, I. Pérez-Arjona, V.Espinosa, P.Alonso. Self-organization of ultrasound in viscous fluids, EPL 92 (2010) 10003. V.J.
- Physical properties of glycerol and its solutions. Glycerine Producers' Association, 1967.
- Kinsler Lawrence E. Fundamentos de Acústica. 4 ed. 2000.
- Ultrasonic Transducers Technical Notes. Olympus Corporation NTD, 2011.
- Mandado Enrique, Murillo Antonio. Sensores y acondicionadores: Sensores de ultrasonidos.
- Luís J. Salmerón. Interacción de los ultrasonidos con medios viscosos. Tesina de Master Universitat Politècnica de València (en realización).<sup>1</sup>
- Mott Robert L. Mecánica de Fluidos. 6 ed. 2006
- W.Marczak . Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids. J. Acoust. Soc. Am. 102(5) pp 2776-2779, 1997.
- Isabel Pérez-Arjona, Víctor J. Sánchez-Morcillo, Víctor Espinosa. Bistable and dynamic states of parametrically excited ultrasound in a fluid-filled interferometer. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 125 (6), June 2009.

## ANEXO I: Especificaciones técnicas del equipamiento utilizado

### I. El transductor

#### I.1. Emisor-receptor Parametrics 500PR

Se trata de un emisor-receptor de ultrasonidos que cuando se utiliza con un transductor apropiado y osciloscopio analógico o digital, constituyen el punto de partida ideal para la detección de fallas por ultrasonido, medición de espesores, caracterización de materiales, y la caracterización de transductores.

El modelo 500PR, actualmente reemplazado por el modelo 5072PR, cuenta con controles en el panel frontal que permiten un fácil ajuste de la altura del pulso (pulse height), amortiguación de la forma de onda (waveform damping), la ganancia del receptor y la tasa de repetición de impulsos (PRF). Un filtro de paso alto seleccionable a través de un interruptor en el panel trasero se puede utilizar para cambiar el tiempo de recuperación del pulso de excitación y rechazar el ruido de baja frecuencia.

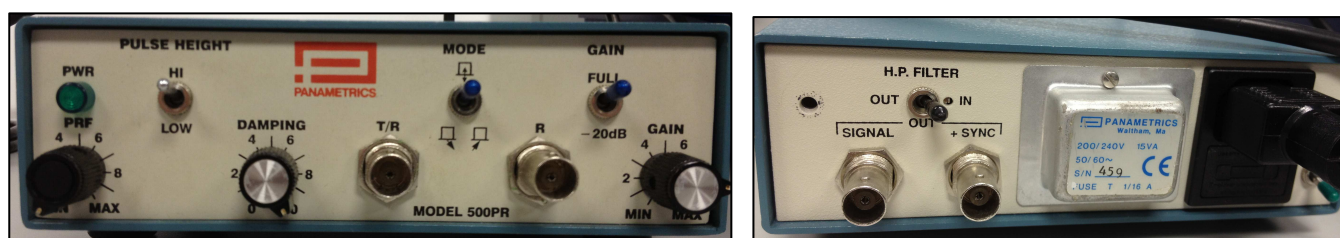


Figura 4941: Emisor-receptor Parametrics 500PR

El ancho de banda pico del emisor ultrasónico es de 35 MHz (-3 dB) y es ideal para la prueba general. El emisor de impulsos proporciona la excitación de banda ancha óptimo resultado en la recuperación de dominio de tiempo superior, especialmente en las frecuencias más altas (entre 15 a 30 MHz).

#### I.2. Transductor piezoeléctrico

El transductor piezoeléctrico es el encargado de convertir los impulsos eléctricos en señales mecánicas y viceversa. Se ha empleado un transductor Parametrics V392-SU. Se trata de un transductor para de tipo videoscan diseñado para inmersión de frecuencia 1 MHz. Es un transductor no sintonizado que proporciona un rendimiento de banda ancha muy amortiguado. Opción utilizada en aplicaciones en las que es necesaria una buena resolución axial o de distancia y en pruebas que requieren una mejor relación señal-ruido debido a la dispersión en los materiales.

Un transductor de inmersión consta de un solo elemento transductor de onda longitudinal con una capa de 1/4 de longitud de onda acústicamente acoplado al agua. Están diseñados específicamente para transmitir ultrasonido en situaciones en las que la pieza de ensayo se sumerge parcialmente o totalmente.

La gran sección del transductor aumenta la longitud del campo cercano permitiendo longitudes focales más largas.

Se emplean en las siguientes aplicaciones:

Escaneo automatizado.

Medición de espesores on-line.

Detección de imperfecciones en tubos, barras, tubos, placas, y otros componentes similares.

Imágenes basadas en el tiempo de vuelo y la amplitud de la señal reflejada.

Análisis de materiales y medidas de velocidad.

Glossary of Transducer Part Numbers		
<b>Transducer Series</b>	<b>Fits Connector Styles</b>	<b>Contouring Wedges</b>
AxxxS Accuscan "S"	RB Right Angle BNC	AID Axial Inside Diameter
AxxxR Accuscan "R"	SB Straight BNC	AOD Axial Outside Diameter
Cxxx CentraScan	RM Right Angle Microdot*	CID Circumferential Inside Diameter
Dxxx Dual	SM Straight Microdot	COD Circumferential Outside Diameter
Vxxx Videoscanner	RU Right Angle UHF	
Xxxx Miscellaneous	SU Straight UHF	<b>Focal Types (Immersion Transducers)</b>
	RP Right Angle Potted Cable	F Spherical Focus
<b>Transducer Type</b>	Terminating in BNC Connectors	CF Cylindrical Focus
1xx Contact	RPL1 Right Angle Potted Cable Terminating in Large Lemo® 1 Connectors	
15x Normal Incidence Shear Wave		<b>Focal Designations</b>
2xx Videoscanner Replaceable Delay Line		FPF Flat Plate Focus
3xx Immersion	<b>Contouring Delays</b>	OLF Optical Lens Focus
4xx Standard Angle Beam	CC-R Concave Radius	PTF Point Target Focus
5xx Miniature Angle Beam	CX-R Convex Radius	
6xx Protected Face		
7xx Dual		

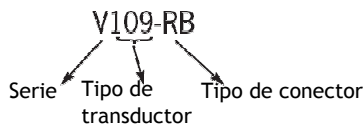


Figura 50: Glosario de las referencias del transductor

Frequency MHz	Nominal Element Size	Transducer Part Numbers		
		ACCUSCAN-S	ACCUSCAN-R	VIDEOSCAN
0.5	1.50" 38mm	A389S-SU	A389R-SU	V389-SU
	1.125" 29mm	A391S-SU	A391R-SU	V391-SU
	1.00" 25mm	A301S-SU	A301R-SU	V301-SU
	0.75" 19mm	—	—	V318-SU
1.0	1.50" 38mm	A392S-SU	A392R-SU	V392-SU
	1.125" 29mm	A394S-SU	A394R-SU	V394-SU
	1.00" 25mm	A302S-SU	A302R-SU	V302-SU
	0.75" 19mm	A314S-SU	A314R-SU	V314-SU
2.25	1.50" 38mm	A395S-SU	A395R-SU	V395-SU
	1.125" 29mm	A397S-SU	A397R-SU	V397-SU
	1.00" 25mm	A304S-SU	A304R-SU	V304-SU
	0.75" 19mm	A305S-SU	A305R-SU	V305-SU
3.5	1.00" 25mm	A380S-SU	A380R-SU	V380-SU
	0.75" 19mm	A381S-SU	A381R-SU	V381-SU
5.0	1.00" 25mm	A307S-SU	A307R-SU	V307-SU
	0.75" 19mm	A308S-SU	A308R-SU	V308-SU
7.5	0.75" 19mm	A321S-SU	A321R-SU	V321-SU
10	1.00" 25mm	—	—	V322-SU
	0.75" 19mm	A315S-SU	A315R-SU	V315-SU



Figura 51: Detalle y especificaciones del transductor Parametrics V392-SU

Table 1 – Near Field Distance of Flat Transducers in Water				
Frequency	Element Diameter	N	Focal Length (PTF)**	
			Min	Max
(MHz)	(inches)	(inches)	(inches)	(inches)
0.5	1.50	4.757	2.15	3.80
	1.125	2.661	1.50	2.10
	1.00	2.095	1.25	1.65
	0.75	1.164	0.78	0.93
1.0	1.50	9.559	2.50	7.65
	1.125	5.366	1.90	4.30
	1.00	4.235	1.625	3.38
	0.75	2.372	1.00	1.90
	0.50	1.043	0.60	0.80

Figura 52: Especificaciones del transductor Parametrics V392-SU

Diámetro del elemento (D): 38,1 mm

Campo próximo (N): 242.80 mm

Longitud focal (F): 63.5 mm (mínima)- 194.31mm (máxima).

Cálculos realizados a partir de las ecuaciones descritas en el apartado 2.3.2:

El campo próximo para agua pura (a 20 °C) es de 24,52 cm, mientras que para glicerina pura (a 20 °C) es de 18,9 cm.

El ángulo de dispersión del haz de pulso-eco (-6 dB) para agua pura (a 20°C) es de 2,72°, mientras que para glicerina pura (a 20 °C) es de 1,48°.

El diámetro de haz, aproximado, es de 9,78 mm.

### I.3. Osciloscopio Tektronix TDS 220

El osciloscopio es un dispositivo de visualización gráfica que permite representar señales eléctricas variables en el tiempo. En la configuración más habitual, el eje vertical representa la tensión que se está midiendo y el eje horizontal representa el tiempo.

El osciloscopio utilizado, Tektronix TDS 220, es un osciloscopio digital. Este tipo de osciloscopios utiliza un convertidor analógico-digital (A/D) para convertir la señal de entrada en información digital. El osciloscopio adquiere la información de la onda como una serie de muestras discretas que son almacenadas hasta que se acumula un número suficiente de datos para describir la forma de la onda, que tras ser reconstruida se muestra en la pantalla. El hecho de que lo que se muestre sea información previamente digitalizada permite que la calidad de la representación –estabilidad, brillo y claridad- sea siempre buena para cualquier señal cuya frecuencia sea menor que la máxima admisible por el muestreo.

La principal ventaja del osciloscopio digital es que permite capturar señales que no sean periódicas (eventos que ocurran sólo una vez y transitorios). Dado que la información de la onda tiene formato digital (una serie almacenada de valores binarios), puede ser analizada, archivada, impresa o procesada, tanto en el propio osciloscopio como en un ordenador externo.

La onda no necesita ser continua. Incluso cuando la señal desaparece, puede seguir siendo mostrada.

En la figura 53 se puede ver un esquema del funcionamiento del osciloscopio digital. Además de las secciones vertical, horizontal y de disparo de un osciloscopio analógico, los osciloscopios digitales poseen un sistema adicional de proceso de datos que permite almacenar, procesar y visualizar la señal de entrada.

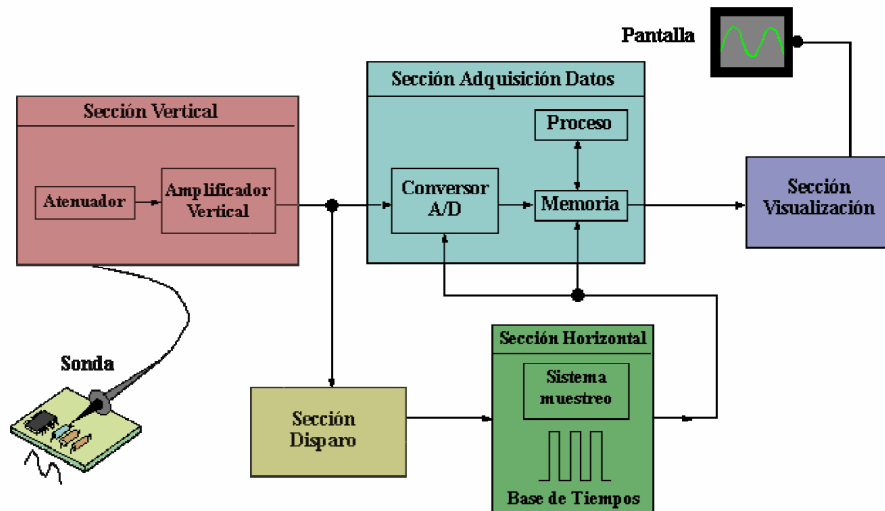


Figura 53: Esquema de funcionamiento del osciloscopio digital

Cuando se conecta la sonda a un circuito, la señal se dirige a la sección vertical donde, al igual que en los osciloscopios analógicos, es atenuada o amplificada dependiendo de dónde se sitúe el control vertical VOLTS/DIV.

La sección de disparo es necesaria para estabilizar las señales periódicas. Para lograr la imagen estable, es necesario que el trazado de la onda comience siempre en el mismo punto. A diferencia de los osciloscopios analógicos, es posible ajustar el disparo para capturar señales transitorias de un único evento y realizar un predisparo para observar procesos que tengan lugar antes del disparo. El disparo determina el momento en el que el osciloscopio empieza a adquirir datos y muestra una forma de onda. Cuando el disparo se configura adecuadamente, puede convertir representaciones inestables o pantallas vacías en formas de onda con significado.

Para traducir la información analógica a formato binario se utiliza el convertor A/D del sistema de adquisición de datos. Con este convertor se muestrea la señal a intervalos de tiempo determinados y convierte la señal de tensión continua en una serie de valores digitales llamados muestras que son almacenados en memoria como puntos de señal. El número de los puntos de señal utilizados para reconstruir la señal en pantalla se denomina registro y dependiendo de las prestaciones del modelo de osciloscopio, esta información se puede procesar adicionalmente para realizar varias operaciones matemáticas y gráficas, mostrando el resultado posteriormente en la pantalla. La longitud de registro en el modelo TDS220 es de 2500 puntos de muestreo por canal.

En la sección horizontal, una señal de reloj determina cuándo el convertor A/D toma las muestras. La velocidad de este reloj se denomina velocidad de muestreo y se mide en muestras por segundo. En el modelo TDS220 es 1GS/s (*gigasample/second*) en cada canal. Por otro lado, mediante el control SEC/DIV es posible ajustar la duración de cada división horizontal de la pantalla.

Finalmente, la sección de visualización recibe los puntos del registro y genera la imagen en la pantalla que típicamente son pantallas de cristal líquido (LCD).

#### I.4. Termómetro digital de precisión Testo 110

##### Datos técnicos

Tipo de sonda: NTC

Rango de medición: -50.....+150°C

Exactitud:  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (-20.....80°C)  
 $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  (rango restante)

Resolución: 0,1°C



*Figura 54: Termómetro digital de precisión Testo 110*

## ANEXO II: Detalle de los resultados obtenidos (tablas)

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1457,0 ± 1,1	28,5	1507,3 ± 1,1	47	1536,4 ± 1,1
10,5	1458,7 ± 1,1	29	1508,7 ± 1,1	47,5	1537,0 ± 1,1
11	1460,4 ± 1,1	29,5	1510,1 ± 1,1	48	1537,5 ± 1,1
11,5	1462,2 ± 1,1	30	1511,0 ± 1,1	48,5	1538,1 ± 1,1
12	1463,7 ± 1,1	30,5	1511,4 ± 1,1	49	1538,5 ± 1,1
12,5	1464,9 ± 1,1	31	1512,3 ± 1,1	49,5	1539,2 ± 1,1
13	1466,5 ± 1,1	31,5	1513,4 ± 1,1	50	1539,6 ± 1,1
13,5	1467,9 ± 1,1	32	1514,3 ± 1,1	50,5	1539,9 ± 1,1
14	1469,4 ± 1,1	32,5	1515,0 ± 1,1	51	1540,5 ± 1,1
14,5	1471,1 ± 1,1	33	1516,0 ± 1,1	51,5	1540,9 ± 1,1
15	1472,8 ± 1,1	33,5	1516,9 ± 1,1	52	1541,2 ± 1,1
15,5	1474,3 ± 1,1	34	1517,7 ± 1,1	52,5	1541,8 ± 1,1
16	1475,7 ± 1,1	34,5	1518,6 ± 1,1	53	1542,2 ± 1,1
16,5	1477,0 ± 1,1	35	1519,3 ± 1,1	53,5	1542,7 ± 1,1
17	1478,6 ± 1,1	35,5	1520,2 ± 1,1	54	1543,1 ± 1,1
17,5	1479,8 ± 1,1	36	1520,9 ± 1,1	54,5	1543,5 ± 1,1
18	1481,5 ± 1,1	36,5	1521,6 ± 1,1	55	1543,7 ± 1,1
18,5	1483,0 ± 1,1	37	1522,0 ± 1,1	55,5	1544,2 ± 1,1
19	1484,6 ± 1,1	37,5	1522,9 ± 1,1	56	1544,6 ± 1,1
19,5	1485,8 ± 1,1	38	1524,0 ± 1,1	56,5	1544,8 ± 1,1
20	1487,2 ± 1,1	38,5	1524,7 ± 1,1	57	1545,1 ± 1,1
20,5	1488,2 ± 1,1	39	1525,4 ± 1,1	57,5	1545,5 ± 1,1
21	1489,8 ± 1,1	39,5	1526,4 ± 1,1	58	1545,7 ± 1,1
21,5	1490,8 ± 1,1	40	1527,1 ± 1,1	58,5	1546,1 ± 1,1
22	1492,0 ± 1,1	40,5	1527,8 ± 1,1	59	1546,3 ± 1,1
22,5	1493,6 ± 1,1	41	1528,7 ± 1,1	59,5	1546,6 ± 1,1
23	1494,6 ± 1,1	41,5	1529,5 ± 1,1	60	1546,8 ± 1,1
23,5	1495,9 ± 1,1	42	1530,0 ± 1,1	60,5	1547,2 ± 1,1
24	1497,3 ± 1,1	42,5	1530,7 ± 1,1	61	1547,4 ± 1,1
24,5	1498,3 ± 1,1	43	1531,5 ± 1,1	61,5	1547,6 ± 1,1
25	1499,4 ± 1,1	43,5	1532,2 ± 1,1	62	1547,8 ± 1,1
25,5	1500,8 ± 1,1	44	1532,8 ± 1,1	62,5	1548,0 ± 1,1
26	1501,6 ± 1,1	44,5	1533,5 ± 1,1	63	1548,1 ± 1,1
26,5	1503,1 ± 1,1	45	1534,0 ± 1,1	63,5	1548,3 ± 1,1
27	1504,3 ± 1,1	45,5	1534,8 ± 1,1	64	1548,3 ± 1,1
27,5	1505,2 ± 1,1	46	1535,3 ± 1,1	64,5	1548,3 ± 1,1
28	1506,2 ± 1,1	46,5	1535,9 ± 1,1	65	1548,1 ± 1,1

Tabla 8: Velocidad de propagación en concentración de 0% de glicerina



Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1553,2 ± 1,1	28,5	1596,0 ± 1,1	47	1622,7 ± 1,2
10,5	1554,5 ± 1,1	29	1596,2 ± 1,1	47,5	1624,8 ± 1,2
11	1555,7 ± 1,1	29,5	1596,8 ± 1,1	48	1625,2 ± 1,2
11,5	1556,8 ± 1,1	30	1598,4 ± 1,1	48,5	1625,4 ± 1,2
12	1558,1 ± 1,1	30,5	1599,4 ± 1,1	49	1625,6 ± 1,2
12,5	1559,1 ± 1,1	31	1601,0 ± 1,1	49,5	1625,8 ± 1,2
13	1560,0 ± 1,1	31,5	1602,2 ± 1,1	50	1626,0 ± 1,2
13,5	1561,2 ± 1,1	32	1603,0 ± 1,1	50,5	1626,4 ± 1,2
14	1562,7 ± 1,1	32,5	1604,0 ± 1,1	51	1626,8 ± 1,2
14,5	1564,8 ± 1,1	33	1604,8 ± 1,1	51,5	1626,8 ± 1,2
15	1565,7 ± 1,1	33,5	1605,2 ± 1,1	52	1627,3 ± 1,2
15,5	1567,1 ± 1,1	34	1606,0 ± 1,1	52,5	1627,3 ± 1,2
16	1568,4 ± 1,1	34,5	1606,4 ± 1,1	53	1627,5 ± 1,2
16,5	1570,6 ± 1,1	35	1606,8 ± 1,1	53,5	1627,7 ± 1,2
17	1571,9 ± 1,1	35,5	1607,0 ± 1,1	54	1627,7 ± 1,2
17,5	1573,1 ± 1,1	36	1607,0 ± 1,1	54,5	1627,9 ± 1,2
18	1573,8 ± 1,1	36,5	1607,2 ± 1,1	55	1628,1 ± 1,2
18,5	1574,4 ± 1,1	37	1607,2 ± 1,1	55,5	1628,1 ± 1,2
19	1574,8 ± 1,1	37,5	1609,1 ± 1,2	56	1628,3 ± 1,2
19,5	1576,5 ± 1,1	38	1610,1 ± 1,2	56,5	1628,3 ± 1,2
20	1577,9 ± 1,1	38,5	1610,9 ± 1,2	57	1628,5 ± 1,2
20,5	1579,5 ± 1,1	39	1611,5 ± 1,2	57,5	1628,5 ± 1,2
21	1580,8 ± 1,1	39,5	1612,3 ± 1,2	58	1628,5 ± 1,2
21,5	1582,2 ± 1,1	40	1612,7 ± 1,2	58,5	1628,7 ± 1,2
22	1583,6 ± 1,1	40,5	1613,3 ± 1,2	59	1628,7 ± 1,2
22,5	1584,7 ± 1,1	41	1613,7 ± 1,2	59,5	1628,9 ± 1,2
23	1586,5 ± 1,1	41,5	1614,1 ± 1,2	60	1629,1 ± 1,2
23,5	1587,5 ± 1,1	42	1614,5 ± 1,2	60,5	1629,1 ± 1,2
24	1588,5 ± 1,1	42,5	1614,9 ± 1,2	61	1629,1 ± 1,2
24,5	1589,3 ± 1,1	43	1616,2 ± 1,2	61,5	1629,7 ± 1,2
25	1590,5 ± 1,1	43,5	1616,4 ± 1,2	62	1629,7 ± 1,2
25,5	1591,2 ± 1,1	44	1617,0 ± 1,2	62,5	1630,8 ± 1,2
26	1592,2 ± 1,1	44,5	1617,6 ± 1,2	63	1630,8 ± 1,2
26,5	1593,2 ± 1,1	45	1617,8 ± 1,2	63,5	1630,8 ± 1,2
27	1594,0 ± 1,1	45,5	1618,2 ± 1,2	64	1630,8 ± 1,2
27,5	1594,6 ± 1,1	46	1618,4 ± 1,2	64,5	1630,6 ± 1,2
28	1595,6 ± 1,1	46,5	1619,2 ± 1,2	65	1630,6 ± 1,2

Tabla 9: Velocidad de propagación en concentración de 10% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1602,4 ± 1,1	28,5	1632,0 ± 1,2	47	1648,0 ± 1,2
10,5	1603,8 ± 1,1	29	1632,4 ± 1,2	47,5	1648,4 ± 1,2
11	1605,8 ± 1,1	29,5	1632,9 ± 1,2	48	1648,6 ± 1,2
11,5	1607,0 ± 1,1	30	1633,5 ± 1,2	48,5	1648,6 ± 1,2
12	1608,2 ± 1,2	30,5	1633,9 ± 1,2	49	1648,8 ± 1,2
12,5	1609,3 ± 1,2	31	1634,3 ± 1,2	49,5	1648,8 ± 1,2
13	1610,1 ± 1,2	31,5	1634,7 ± 1,2	50	1649,1 ± 1,2
13,5	1611,1 ± 1,2	32	1635,8 ± 1,2	50,5	1649,1 ± 1,2
14	1612,1 ± 1,2	32,5	1635,8 ± 1,2	51	1649,1 ± 1,2
14,5	1612,9 ± 1,2	33	1636,0 ± 1,2	51,5	1649,3 ± 1,2
15	1613,7 ± 1,2	33,5	1636,2 ± 1,2	52	1649,3 ± 1,2
15,5	1614,5 ± 1,2	34	1636,8 ± 1,2	52,5	1649,3 ± 1,2
16	1615,3 ± 1,2	34,5	1637,0 ± 1,2	53	1649,3 ± 1,2
16,5	1616,2 ± 1,2	35	1637,2 ± 1,2	53,5	1649,3 ± 1,2
17	1616,8 ± 1,2	35,5	1638,1 ± 1,2	54	1649,1 ± 1,2
17,5	1617,6 ± 1,2	36	1639,8 ± 1,2	54,5	1649,1 ± 1,2
18	1618,2 ± 1,2	36,5	1640,4 ± 1,2	55	1649,1 ± 1,2
18,5	1619,0 ± 1,2	37	1641,4 ± 1,2	55,5	1649,1 ± 1,2
19	1619,8 ± 1,2	37,5	1643,1 ± 1,2	56	1648,8 ± 1,2
19,5	1620,5 ± 1,2	38	1643,6 ± 1,2	56,5	1648,8 ± 1,2
20	1621,3 ± 1,2	38,5	1643,8 ± 1,2	57	1648,6 ± 1,2
20,5	1621,9 ± 1,2	39	1644,2 ± 1,2	57,5	1648,6 ± 1,2
21	1622,7 ± 1,2	39,5	1644,6 ± 1,2	58	1648,4 ± 1,2
21,5	1623,3 ± 1,2	40	1645,0 ± 1,2	58,5	1648,4 ± 1,2
22	1623,7 ± 1,2	40,5	1645,2 ± 1,2	59	1648,2 ± 1,2
22,5	1624,4 ± 1,2	41	1645,7 ± 1,2	59,5	1648,2 ± 1,2
23	1625,4 ± 1,2	41,5	1645,9 ± 1,2	60	1648,2 ± 1,2
23,5	1625,8 ± 1,2	42	1646,1 ± 1,2	60,5	1648,0 ± 1,2
24	1626,2 ± 1,2	42,5	1646,5 ± 1,2	61	1647,8 ± 1,2
24,5	1627,0 ± 1,2	43	1646,7 ± 1,2	61,5	1647,6 ± 1,2
25	1627,7 ± 1,2	43,5	1646,9 ± 1,2	62	1647,6 ± 1,2
25,5	1628,3 ± 1,2	44	1647,1 ± 1,2	62,5	1647,4 ± 1,2
26	1628,9 ± 1,2	44,5	1647,4 ± 1,2	63	1647,1 ± 1,2
26,5	1629,7 ± 1,2	45	1647,6 ± 1,2	63,5	1646,9 ± 1,2
27	1630,4 ± 1,2	45,5	1647,6 ± 1,2	64	1646,5 ± 1,2
27,5	1630,8 ± 1,2	46	1647,8 ± 1,2	64,5	1646,3 ± 1,2
28	1631,4 ± 1,2	46,5	1648,0 ± 1,2	65	1645,9 ± 1,2

Tabla 10: Velocidad de propagación en concentración de 20% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1650,3 ± 1,2	28,5	1665,4 ± 1,2	47	1666,9 ± 1,2
10,5	1651,0 ± 1,2	29	1665,6 ± 1,2	47,5	1666,7 ± 1,2
11	1651,4 ± 1,2	29,5	1665,8 ± 1,2	48	1666,4 ± 1,2
11,5	1652,0 ± 1,2	30	1666,0 ± 1,2	48,5	1666,2 ± 1,2
12	1652,7 ± 1,2	30,5	1666,2 ± 1,2	49	1666,0 ± 1,2
12,5	1653,5 ± 1,2	31	1666,4 ± 1,2	49,5	1665,8 ± 1,2
13	1654,0 ± 1,2	31,5	1666,7 ± 1,2	50	1665,6 ± 1,2
13,5	1654,6 ± 1,2	32	1666,9 ± 1,2	50,5	1665,4 ± 1,2
14	1655,2 ± 1,2	32,5	1667,1 ± 1,2	51	1665,1 ± 1,2
14,5	1655,9 ± 1,2	33	1667,3 ± 1,2	51,5	1664,9 ± 1,2
15	1656,5 ± 1,2	33,5	1667,3 ± 1,2	52	1664,7 ± 1,2
15,5	1657,0 ± 1,2	34	1667,5 ± 1,2	52,5	1664,5 ± 1,2
16	1657,4 ± 1,2	34,5	1667,8 ± 1,2	53	1664,3 ± 1,2
16,5	1658,0 ± 1,2	35	1668,0 ± 1,2	53,5	1663,9 ± 1,2
17	1658,7 ± 1,2	35,5	1668,0 ± 1,2	54	1663,6 ± 1,2
17,5	1658,9 ± 1,2	36	1668,0 ± 1,2	54,5	1663,4 ± 1,2
18	1659,1 ± 1,2	36,5	1668,2 ± 1,2	55	1663,2 ± 1,2
18,5	1659,5 ± 1,2	37	1668,4 ± 1,2	55,5	1662,8 ± 1,2
19	1660,0 ± 1,2	37,5	1668,2 ± 1,2	56	1662,6 ± 1,2
19,5	1660,2 ± 1,2	38	1668,2 ± 1,2	56,5	1662,1 ± 1,2
20	1660,2 ± 1,2	38,5	1668,2 ± 1,2	57	1661,9 ± 1,2
20,5	1660,6 ± 1,2	39	1668,2 ± 1,2	57,5	1661,5 ± 1,2
21	1661,3 ± 1,2	39,5	1668,2 ± 1,2	58	1661,3 ± 1,2
21,5	1661,7 ± 1,2	40	1668,2 ± 1,2	58,5	1660,8 ± 1,2
22	1661,9 ± 1,2	40,5	1668,2 ± 1,2	59	1660,4 ± 1,2
22,5	1662,3 ± 1,2	41	1668,0 ± 1,2	59,5	1660,2 ± 1,2
23	1662,8 ± 1,2	41,5	1668,0 ± 1,2	60	1659,8 ± 1,2
23,5	1663,0 ± 1,2	42	1668,0 ± 1,2	60,5	1659,3 ± 1,2
24	1663,2 ± 1,2	42,5	1668,0 ± 1,2	61	1659,1 ± 1,2
24,5	1663,6 ± 1,2	43	1667,8 ± 1,2	61,5	1658,5 ± 1,2
25	1664,1 ± 1,2	43,5	1667,8 ± 1,2	62	1658,0 ± 1,2
25,5	1664,3 ± 1,2	44	1667,8 ± 1,2	62,5	1657,6 ± 1,2
26	1664,5 ± 1,2	44,5	1667,5 ± 1,2	63	1657,4 ± 1,2
26,5	1664,7 ± 1,2	45	1667,3 ± 1,2	63,5	1657,0 ± 1,2
27	1664,9 ± 1,2	45,5	1667,3 ± 1,2	64	1656,3 ± 1,2
27,5	1665,1 ± 1,2	46	1667,1 ± 1,2	64,5	1655,9 ± 1,2
28	1665,1 ± 1,2	46,5	1666,9 ± 1,2	65	1655,5 ± 1,2

Tabla 11: Velocidad de propagación en concentración de 30% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1708,0 ± 1,2	28,5	1714,3 ± 1,2	47	1708,7 ± 1,2
10,5	1708,5 ± 1,2	29	1714,3 ± 1,2	47,5	1708,5 ± 1,2
11	1708,9 ± 1,2	29,5	1714,3 ± 1,2	48	1708,0 ± 1,2
11,5	1709,4 ± 1,2	30	1714,3 ± 1,2	48,5	1707,8 ± 1,2
12	1709,9 ± 1,2	30,5	1714,3 ± 1,2	49	1707,5 ± 1,2
12,5	1710,1 ± 1,2	31	1714,3 ± 1,2	49,5	1707,1 ± 1,2
13	1710,3 ± 1,2	31,5	1714,3 ± 1,2	50	1706,8 ± 1,2
13,5	1710,6 ± 1,2	32	1714,3 ± 1,2	50,5	1706,6 ± 1,2
14	1710,8 ± 1,2	32,5	1714,1 ± 1,2	51	1706,1 ± 1,2
14,5	1711,0 ± 1,2	33	1714,1 ± 1,2	51,5	1705,9 ± 1,2
15	1711,3 ± 1,2	33,5	1714,1 ± 1,2	52	1705,4 ± 1,2
15,5	1711,5 ± 1,2	34	1713,8 ± 1,2	52,5	1705,2 ± 1,2
16	1711,7 ± 1,2	34,5	1713,8 ± 1,2	53	1704,7 ± 1,2
16,5	1712,0 ± 1,2	35	1713,8 ± 1,2	53,5	1704,3 ± 1,2
17	1712,2 ± 1,2	35,5	1713,6 ± 1,2	54	1703,8 ± 1,2
17,5	1712,4 ± 1,2	36	1713,6 ± 1,2	54,5	1703,6 ± 1,2
18	1712,7 ± 1,2	36,5	1713,4 ± 1,2	55	1703,1 ± 1,2
18,5	1712,7 ± 1,2	37	1713,4 ± 1,2	55,5	1702,6 ± 1,2
19	1712,9 ± 1,2	37,5	1713,1 ± 1,2	56	1702,2 ± 1,2
19,5	1713,1 ± 1,2	38	1713,1 ± 1,2	56,5	1701,7 ± 1,2
20	1713,1 ± 1,2	38,5	1712,9 ± 1,2	57	1701,3 ± 1,2
20,5	1713,4 ± 1,2	39	1712,7 ± 1,2	57,5	1701,0 ± 1,2
21	1713,4 ± 1,2	39,5	1712,7 ± 1,2	58	1700,8 ± 1,2
21,5	1713,6 ± 1,2	40	1712,4 ± 1,2	58,5	1700,3 ± 1,2
22	1713,6 ± 1,2	40,5	1712,2 ± 1,2	59	1699,9 ± 1,2
22,5	1713,6 ± 1,2	41	1712,0 ± 1,2	59,5	1699,4 ± 1,2
23	1713,8 ± 1,2	41,5	1711,7 ± 1,2	60	1698,9 ± 1,2
23,5	1713,8 ± 1,2	42	1711,5 ± 1,2	60,5	1698,5 ± 1,2
24	1714,1 ± 1,2	42,5	1711,0 ± 1,2	61	1697,8 ± 1,2
24,5	1714,1 ± 1,2	43	1710,8 ± 1,2	61,5	1697,3 ± 1,2
25	1714,1 ± 1,2	43,5	1710,6 ± 1,2	62	1697,1 ± 1,2
25,5	1714,1 ± 1,2	44	1710,3 ± 1,2	62,5	1696,4 ± 1,2
26	1714,1 ± 1,2	44,5	1710,1 ± 1,2	63	1695,3 ± 1,2
26,5	1714,1 ± 1,2	45	1709,9 ± 1,2	63,5	1694,8 ± 1,2
27	1714,3 ± 1,2	45,5	1709,6 ± 1,2	64	1694,3 ± 1,2
27,5	1714,3 ± 1,2	46	1709,2 ± 1,2	64,5	1694,1 ± 1,2
28	1714,3 ± 1,2	46,5	1708,9 ± 1,2	65	1693,0 ± 1,2

Tabla 12: Velocidad de propagación en concentración de 35% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1723,5 ± 1,2	28,5	1725,2 ± 1,2	47	1716,1 ± 1,2
10,5	1723,8 ± 1,2	29	1725,2 ± 1,2	47,5	1715,7 ± 1,2
11	1724,0 ± 1,2	29,5	1725,2 ± 1,2	48	1715,2 ± 1,2
11,5	1724,2 ± 1,2	30	1724,9 ± 1,2	48,5	1714,8 ± 1,2
12	1724,5 ± 1,2	30,5	1724,9 ± 1,2	49	1714,3 ± 1,2
12,5	1724,7 ± 1,2	31	1724,7 ± 1,2	49,5	1713,8 ± 1,2
13	1724,9 ± 1,2	31,5	1724,7 ± 1,2	50	1713,4 ± 1,2
13,5	1724,9 ± 1,2	32	1724,5 ± 1,2	50,5	1712,9 ± 1,2
14	1725,2 ± 1,2	32,5	1724,2 ± 1,2	51	1712,5 ± 1,2
14,5	1725,4 ± 1,2	33	1724,2 ± 1,2	51,5	1712,0 ± 1,2
15	1725,4 ± 1,2	33,5	1724,0 ± 1,2	52	1711,6 ± 1,2
15,5	1725,6 ± 1,2	34	1724,0 ± 1,2	52,5	1711,1 ± 1,2
16	1725,6 ± 1,2	34,5	1723,8 ± 1,2	53	1710,4 ± 1,2
16,5	1725,9 ± 1,2	35	1723,8 ± 1,2	53,5	1709,9 ± 1,2
17	1725,9 ± 1,2	35,5	1723,5 ± 1,2	54	1709,5 ± 1,2
17,5	1725,9 ± 1,2	36	1723,5 ± 1,2	54,5	1709,0 ± 1,2
18	1725,9 ± 1,2	36,5	1723,3 ± 1,2	55	1708,4 ± 1,2
18,5	1726,1 ± 1,2	37	1723,1 ± 1,2	55,5	1707,9 ± 1,2
19	1726,1 ± 1,2	37,5	1722,8 ± 1,2	56	1707,4 ± 1,2
19,5	1726,1 ± 1,2	38	1722,6 ± 1,2	56,5	1706,8 ± 1,2
20	1726,1 ± 1,2	38,5	1722,1 ± 1,2	57	1706,3 ± 1,2
20,5	1726,1 ± 1,2	39	1721,9 ± 1,2	57,5	1705,6 ± 1,2
21	1726,1 ± 1,2	39,5	1721,7 ± 1,2	58	1705,2 ± 1,2
21,5	1726,1 ± 1,2	40	1721,2 ± 1,2	58,5	1704,5 ± 1,2
22	1726,1 ± 1,2	40,5	1721,0 ± 1,2	59	1704,0 ± 1,2
22,5	1726,1 ± 1,2	41	1720,8 ± 1,2	59,5	1703,4 ± 1,2
23	1726,1 ± 1,2	41,5	1720,3 ± 1,2	60	1702,7 ± 1,2
23,5	1726,1 ± 1,2	42	1720,1 ± 1,2	60,5	1702,2 ± 1,2
24	1726,1 ± 1,2	42,5	1719,6 ± 1,2	61	1701,5 ± 1,2
24,5	1726,1 ± 1,2	43	1719,4 ± 1,2	61,5	1701,1 ± 1,2
25	1725,9 ± 1,2	43,5	1718,9 ± 1,2	62	1700,4 ± 1,2
25,5	1725,9 ± 1,2	44	1718,4 ± 1,2	62,5	1699,7 ± 1,2
26	1725,9 ± 1,2	44,5	1718,2 ± 1,2	63	1699,1 ± 1,2
26,5	1725,6 ± 1,2	45	1717,8 ± 1,2	63,5	1698,6 ± 1,2
27	1725,4 ± 1,2	45,5	1717,3 ± 1,2	64	1697,7 ± 1,2
27,5	1725,4 ± 1,2	46	1717,1 ± 1,2	64,5	1697,3 ± 1,2
28	1725,4 ± 1,2	46,5	1716,6 ± 1,2	65	1696,6 ± 1,2

Tabla 13: Velocidad de propagación en concentración de 40% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1758,2 ± 1,2	28,5	1748,9 ± 1,2	47	1730,4 ± 1,2
10,5	1758,0 ± 1,2	29	1748,4 ± 1,2	47,5	1730,0 ± 1,2
11	1758,0 ± 1,2	29,5	1748,2 ± 1,2	48	1729,3 ± 1,2
11,5	1757,8 ± 1,2	30	1747,9 ± 1,2	48,5	1728,8 ± 1,2
12	1757,5 ± 1,2	30,5	1747,7 ± 1,2	49	1727,9 ± 1,2
12,5	1757,5 ± 1,2	31	1747,4 ± 1,2	49,5	1727,4 ± 1,2
13	1757,3 ± 1,2	31,5	1747,2 ± 1,2	50	1726,7 ± 1,2
13,5	1757,0 ± 1,2	32	1746,7 ± 1,2	50,5	1726,0 ± 1,2
14	1757,0 ± 1,2	32,5	1746,2 ± 1,2	51	1725,3 ± 1,2
14,5	1756,8 ± 1,2	33	1745,8 ± 1,2	51,5	1724,6 ± 1,2
15	1756,6 ± 1,2	33,5	1745,3 ± 1,2	52	1724,1 ± 1,2
15,5	1756,3 ± 1,2	34	1744,8 ± 1,2	52,5	1723,7 ± 1,2
16	1756,1 ± 1,2	34,5	1744,3 ± 1,2	53	1723,0 ± 1,2
16,5	1755,8 ± 1,2	35	1743,9 ± 1,2	53,5	1722,3 ± 1,2
17	1755,6 ± 1,2	35,5	1743,4 ± 1,2	54	1721,8 ± 1,2
17,5	1755,3 ± 1,2	36	1742,9 ± 1,2	54,5	1721,1 ± 1,2
18	1755,1 ± 1,2	36,5	1742,4 ± 1,2	55	1720,4 ± 1,2
18,5	1755,1 ± 1,2	37	1742,0 ± 1,2	55,5	1719,7 ± 1,2
19	1754,9 ± 1,2	37,5	1741,5 ± 1,2	56	1719,0 ± 1,2
19,5	1754,6 ± 1,2	38	1741,0 ± 1,2	56,5	1718,4 ± 1,2
20	1754,4 ± 1,2	38,5	1740,5 ± 1,2	57	1717,7 ± 1,2
20,5	1754,1 ± 1,2	39	1739,8 ± 1,2	57,5	1717,2 ± 1,2
21	1753,7 ± 1,2	39,5	1739,4 ± 1,2	58	1716,5 ± 1,2
21,5	1753,2 ± 1,2	40	1738,7 ± 1,2	58,5	1715,8 ± 1,2
22	1752,9 ± 1,2	40,5	1738,2 ± 1,2	59	1714,9 ± 1,2
22,5	1752,7 ± 1,2	41	1737,7 ± 1,2	59,5	1714,4 ± 1,2
23	1752,5 ± 1,2	41,5	1737,2 ± 1,2	60	1713,5 ± 1,2
23,5	1752,2 ± 1,2	42	1736,5 ± 1,2	60,5	1712,8 ± 1,2
24	1751,7 ± 1,2	42,5	1736,1 ± 1,2	61	1712,4 ± 1,2
24,5	1751,3 ± 1,2	43	1735,4 ± 1,2	61,5	1711,5 ± 1,2
25	1751,0 ± 1,2	43,5	1734,9 ± 1,2	62	1710,8 ± 1,2
25,5	1750,5 ± 1,2	44	1734,4 ± 1,2	62,5	1710,1 ± 1,2
26	1750,1 ± 1,2	44,5	1733,7 ± 1,2	63	1709,4 ± 1,2
26,5	1749,8 ± 1,2	45	1733,0 ± 1,2	63,5	1708,9 ± 1,2
27	1749,6 ± 1,2	45,5	1732,3 ± 1,2	64	1708,0 ± 1,2
27,5	1749,4 ± 1,2	46	1731,8 ± 1,2	64,5	1707,6 ± 1,2
28	1749,1 ± 1,2	46,5	1731,1 ± 1,2	65	1706,9 ± 1,2

Tabla 14: Velocidad de propagación en concentración de 50% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1800,3 ± 1,3	28,5	1775,8 ± 1,3	47	1744,3 ± 1,2
10,5	1799,5 ± 1,3	29	1775,1 ± 1,3	47,5	1743,4 ± 1,2
11	1798,8 ± 1,3	29,5	1774,3 ± 1,3	48	1742,7 ± 1,2
11,5	1798,3 ± 1,3	30	1773,3 ± 1,3	48,5	1741,7 ± 1,2
12	1797,8 ± 1,3	30,5	1772,4 ± 1,3	49	1740,5 ± 1,2
12,5	1797,2 ± 1,3	31	1771,6 ± 1,3	49,5	1739,6 ± 1,2
13	1796,2 ± 1,3	31,5	1771,1 ± 1,3	50	1738,9 ± 1,2
13,5	1795,5 ± 1,3	32	1770,4 ± 1,3	50,5	1738,2 ± 1,2
14	1794,7 ± 1,3	32,5	1769,9 ± 1,3	51	1737,2 ± 1,2
14,5	1794,5 ± 1,3	33	1769,4 ± 1,3	51,5	1736,3 ± 1,2
15	1793,7 ± 1,3	33,5	1768,4 ± 1,3	52	1735,6 ± 1,2
15,5	1793,0 ± 1,3	34	1767,5 ± 1,3	52,5	1734,7 ± 1,2
16	1792,5 ± 1,3	34,5	1766,7 ± 1,3	53	1733,7 ± 1,2
16,5	1792,0 ± 1,3	35	1765,8 ± 1,3	53,5	1732,8 ± 1,2
17	1791,5 ± 1,3	35,5	1765,0 ± 1,3	54	1731,8 ± 1,2
17,5	1791,0 ± 1,3	36	1764,1 ± 1,3	54,5	1730,9 ± 1,2
18	1790,5 ± 1,3	36,5	1763,1 ± 1,3	55	1730,0 ± 1,2
18,5	1789,7 ± 1,3	37	1762,4 ± 1,3	55,5	1729,0 ± 1,2
19	1789,2 ± 1,3	37,5	1761,4 ± 1,2	56	1727,9 ± 1,2
19,5	1788,2 ± 1,3	38	1760,4 ± 1,2	56,5	1727,2 ± 1,2
20	1787,7 ± 1,3	38,5	1759,7 ± 1,2	57	1726,2 ± 1,2
20,5	1786,7 ± 1,3	39	1758,7 ± 1,2	57,5	1725,3 ± 1,2
21	1786,2 ± 1,3	39,5	1758,0 ± 1,2	58	1724,4 ± 1,2
21,5	1785,2 ± 1,3	40	1757,0 ± 1,2	58,5	1723,7 ± 1,2
22	1784,7 ± 1,3	40,5	1756,1 ± 1,2	59	1722,5 ± 1,2
22,5	1784,0 ± 1,3	41	1754,9 ± 1,2	59,5	1721,6 ± 1,2
23	1783,7 ± 1,3	41,5	1754,4 ± 1,2	60	1720,9 ± 1,2
23,5	1783,0 ± 1,3	42	1753,2 ± 1,2	60,5	1720,0 ± 1,2
24	1781,7 ± 1,3	42,5	1752,5 ± 1,2	61	1719,5 ± 1,2
24,5	1781,0 ± 1,3	43	1751,5 ± 1,2	61,5	1719,0 ± 1,2
25	1780,0 ± 1,3	43,5	1750,8 ± 1,2	62	1717,4 ± 1,2
25,5	1779,5 ± 1,3	44	1749,8 ± 1,2	62,5	1716,3 ± 1,2
26	1778,8 ± 1,3	44,5	1748,9 ± 1,2	63	1715,4 ± 1,2
26,5	1778,0 ± 1,3	45	1747,7 ± 1,2	63,5	1714,7 ± 1,2
27	1777,3 ± 1,3	45,5	1747,0 ± 1,2	64	1713,5 ± 1,2
27,5	1776,8 ± 1,3	46	1746,0 ± 1,2	64,5	1712,8 ± 1,2
28	1776,3 ± 1,3	46,5	1744,8 ± 1,2	65	1711,5 ± 1,2

Tabla 15: Velocidad de propagación en concentración de 60% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1853,7 ± 1,3	28,5	1834,1 ± 1,3	47	1807,9 ± 1,3
10,5	1852,9 ± 1,3	29	1833,8 ± 1,3	47,5	1806,9 ± 1,3
11	1852,1 ± 1,3	29,5	1833,5 ± 1,3	48	1805,9 ± 1,3
11,5	1851,9 ± 1,3	30	1833,0 ± 1,3	48,5	1805,1 ± 1,3
12	1851,3 ± 1,3	30,5	1832,8 ± 1,3	49	1804,3 ± 1,3
12,5	1850,8 ± 1,3	31	1832,5 ± 1,3	49,5	1803,3 ± 1,3
13	1850,2 ± 1,3	31,5	1832,0 ± 1,3	50	1802,3 ± 1,3
13,5	1850,0 ± 1,3	32	1831,2 ± 1,3	50,5	1801,5 ± 1,3
14	1849,7 ± 1,3	32,5	1830,1 ± 1,3	51	1800,8 ± 1,3
14,5	1849,4 ± 1,3	33	1829,4 ± 1,3	51,5	1799,8 ± 1,3
15	1848,4 ± 1,3	33,5	1828,6 ± 1,3	52	1799,0 ± 1,3
15,5	1847,8 ± 1,3	34	1827,8 ± 1,3	52,5	1798,0 ± 1,3
16	1847,6 ± 1,3	34,5	1827,0 ± 1,3	53	1797,0 ± 1,3
16,5	1847,3 ± 1,3	35	1826,5 ± 1,3	53,5	1796,2 ± 1,3
17	1847,0 ± 1,3	35,5	1826,2 ± 1,3	54	1795,5 ± 1,3
17,5	1846,8 ± 1,3	36	1826,0 ± 1,3	54,5	1794,5 ± 1,3
18	1846,5 ± 1,3	36,5	1825,4 ± 1,3	55	1793,5 ± 1,3
18,5	1846,2 ± 1,3	37	1824,7 ± 1,3	55,5	1792,7 ± 1,3
19	1845,4 ± 1,3	37,5	1823,9 ± 1,3	56	1792,0 ± 1,3
19,5	1844,9 ± 1,3	38	1823,1 ± 1,3	56,5	1791,0 ± 1,3
20	1844,4 ± 1,3	38,5	1822,3 ± 1,3	57	1790,2 ± 1,3
20,5	1843,8 ± 1,3	39	1821,3 ± 1,3	57,5	1789,2 ± 1,3
21	1843,3 ± 1,3	39,5	1820,8 ± 1,3	58	1788,2 ± 1,3
21,5	1842,8 ± 1,3	40	1819,7 ± 1,3	58,5	1787,5 ± 1,3
22	1842,3 ± 1,3	40,5	1819,0 ± 1,3	59	1786,7 ± 1,3
22,5	1841,7 ± 1,3	41	1818,2 ± 1,3	59,5	1785,7 ± 1,3
23	1841,2 ± 1,3	41,5	1817,4 ± 1,3	60	1784,7 ± 1,3
23,5	1840,9 ± 1,3	42	1816,4 ± 1,3	60,5	1784,0 ± 1,3
24	1840,7 ± 1,3	42,5	1815,6 ± 1,3	61	1783,0 ± 1,3
24,5	1840,1 ± 1,3	43	1814,8 ± 1,3	61,5	1782,2 ± 1,3
25	1839,1 ± 1,3	43,5	1813,8 ± 1,3	62	1781,5 ± 1,3
25,5	1838,0 ± 1,3	44	1813,0 ± 1,3	62,5	1780,5 ± 1,3
26	1837,2 ± 1,3	44,5	1812,3 ± 1,3	63	1779,5 ± 1,3
26,5	1836,4 ± 1,3	45	1811,2 ± 1,3	63,5	1778,5 ± 1,3
27	1835,7 ± 1,3	45,5	1810,2 ± 1,3	64	1777,8 ± 1,3
27,5	1835,1 ± 1,3	46	1809,4 ± 1,3	64,5	1777,0 ± 1,3
28	1834,6 ± 1,3	46,5	1808,7 ± 1,3	65	1776,1 ± 1,3

Tabla 16: Velocidad de propagación en concentración de 70% de glicerina



Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1878,5 ± 1,3	28,5	1850,5 ± 1,3	47	1816,4 ± 1,3
10,5	1877,7 ± 1,3	29	1848,9 ± 1,3	47,5	1815,3 ± 1,3
11	1876,8 ± 1,3	29,5	1847,8 ± 1,3	48	1814,6 ± 1,3
11,5	1876,0 ± 1,3	30	1846,5 ± 1,3	48,5	1813,8 ± 1,3
12	1875,2 ± 1,3	30,5	1845,7 ± 1,3	49	1812,8 ± 1,3
12,5	1874,4 ± 1,3	31	1844,4 ± 1,3	49,5	1811,7 ± 1,3
13	1873,8 ± 1,3	31,5	1843,3 ± 1,3	50	1810,7 ± 1,3
13,5	1873,0 ± 1,3	32	1842,3 ± 1,3	50,5	1809,7 ± 1,3
14	1872,2 ± 1,3	32,5	1841,5 ± 1,3	51	1808,7 ± 1,3
14,5	1871,3 ± 1,3	33	1840,9 ± 1,3	51,5	1807,7 ± 1,3
15	1870,8 ± 1,3	33,5	1839,6 ± 1,3	52	1806,6 ± 1,3
15,5	1870,0 ± 1,3	34	1838,6 ± 1,3	52,5	1805,6 ± 1,3
16	1869,4 ± 1,3	34,5	1837,8 ± 1,3	53	1804,6 ± 1,3
16,5	1868,6 ± 1,3	35	1836,7 ± 1,3	53,5	1803,6 ± 1,3
17	1868,1 ± 1,3	35,5	1835,9 ± 1,3	54	1802,6 ± 1,3
17,5	1867,3 ± 1,3	36	1835,1 ± 1,3	54,5	1801,5 ± 1,3
18	1866,2 ± 1,3	36,5	1834,1 ± 1,3	55	1800,5 ± 1,3
18,5	1865,3 ± 1,3	37	1833,0 ± 1,3	55,5	1799,5 ± 1,3
19	1864,8 ± 1,3	37,5	1832,2 ± 1,3	56	1798,8 ± 1,3
19,5	1864,0 ± 1,3	38	1831,4 ± 1,3	56,5	1797,8 ± 1,3
20	1863,2 ± 1,3	38,5	1830,4 ± 1,3	57	1797,0 ± 1,3
20,5	1862,4 ± 1,3	39	1829,6 ± 1,3	57,5	1796,0 ± 1,3
21	1861,5 ± 1,3	39,5	1829,1 ± 1,3	58	1795,0 ± 1,3
21,5	1861,0 ± 1,3	40	1828,6 ± 1,3	58,5	1794,0 ± 1,3
22	1860,2 ± 1,3	40,5	1827,8 ± 1,3	59	1793,0 ± 1,3
22,5	1859,4 ± 1,3	41	1827,0 ± 1,3	59,5	1792,0 ± 1,3
23	1858,6 ± 1,3	41,5	1826,5 ± 1,3	60	1790,7 ± 1,3
23,5	1857,8 ± 1,3	42	1826,0 ± 1,3	60,5	1790,0 ± 1,3
24	1857,2 ± 1,3	42,5	1825,2 ± 1,3	61	1789,0 ± 1,3
24,5	1856,4 ± 1,3	43	1824,4 ± 1,3	61,5	1788,2 ± 1,3
25	1855,6 ± 1,3	43,5	1823,6 ± 1,3	62	1787,0 ± 1,3
25,5	1855,1 ± 1,3	44	1822,8 ± 1,3	62,5	1786,0 ± 1,3
26	1854,3 ± 1,3	44,5	1821,8 ± 1,3	63	1785,0 ± 1,3
26,5	1853,7 ± 1,3	45	1820,8 ± 1,3	63,5	1784,0 ± 1,3
27	1853,2 ± 1,3	45,5	1819,5 ± 1,3	64	1783,2 ± 1,3
27,5	1852,7 ± 1,3	46	1818,4 ± 1,3	64,5	1782,0 ± 1,3
28	1851,9 ± 1,3	46,5	1817,4 ± 1,3	65	1781,2 ± 1,3

Tabla 17: Velocidad de propagación en concentración de 80% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1913,0 ± 1,4	28,5	1882,1 ± 1,3	47	1840,9 ± 1,3
10,5	1912,2 ± 1,4	29	1881,2 ± 1,3	47,5	1840,1 ± 1,3
11	1911,0 ± 1,4	29,5	1879,9 ± 1,3	48	1838,8 ± 1,3
11,5	1910,4 ± 1,3	30	1879,0 ± 1,3	48,5	1837,8 ± 1,3
12	1909,9 ± 1,3	30,5	1877,9 ± 1,3	49	1836,4 ± 1,3
12,5	1909,3 ± 1,3	31	1876,6 ± 1,3	49,5	1835,4 ± 1,3
13	1908,7 ± 1,3	31,5	1875,2 ± 1,3	50	1834,3 ± 1,3
13,5	1907,3 ± 1,3	32	1874,4 ± 1,3	50,5	1833,3 ± 1,3
14	1906,7 ± 1,3	32,5	1873,3 ± 1,3	51	1832,5 ± 1,3
14,5	1906,2 ± 1,3	33	1872,2 ± 1,3	51,5	1831,2 ± 1,3
15	1905,6 ± 1,3	33,5	1871,1 ± 1,3	52	1830,1 ± 1,3
15,5	1905,0 ± 1,3	34	1870,0 ± 1,3	52,5	1828,8 ± 1,3
16	1903,9 ± 1,3	34,5	1869,2 ± 1,3	53	1828,0 ± 1,3
16,5	1903,3 ± 1,3	35	1868,3 ± 1,3	53,5	1827,0 ± 1,3
17	1901,1 ± 1,3	35,5	1867,3 ± 1,3	54	1826,0 ± 1,3
17,5	1900,5 ± 1,3	36	1866,2 ± 1,3	54,5	1824,7 ± 1,3
18	1899,7 ± 1,3	36,5	1865,1 ± 1,3	55	1823,6 ± 1,3
18,5	1899,1 ± 1,3	37	1863,7 ± 1,3	55,5	1822,8 ± 1,3
19	1898,5 ± 1,3	37,5	1862,4 ± 1,3	56	1821,8 ± 1,3
19,5	1898,0 ± 1,3	38	1861,0 ± 1,3	56,5	1820,5 ± 1,3
20	1897,4 ± 1,3	38,5	1859,9 ± 1,3	57	1819,5 ± 1,3
20,5	1895,7 ± 1,3	39	1858,8 ± 1,3	57,5	1818,7 ± 1,3
21	1894,1 ± 1,3	39,5	1857,5 ± 1,3	58	1817,7 ± 1,3
21,5	1893,2 ± 1,3	40	1856,4 ± 1,3	58,5	1816,6 ± 1,3
22	1892,4 ± 1,3	40,5	1855,3 ± 1,3	59	1815,6 ± 1,3
22,5	1891,8 ± 1,3	41	1854,0 ± 1,3	59,5	1814,6 ± 1,3
23	1891,3 ± 1,3	41,5	1852,9 ± 1,3	60	1813,5 ± 1,3
23,5	1890,1 ± 1,3	42	1851,9 ± 1,3	60,5	1812,8 ± 1,3
24	1889,6 ± 1,3	42,5	1850,8 ± 1,3	61	1811,7 ± 1,3
24,5	1889,0 ± 1,3	43	1849,7 ± 1,3	61,5	1811,0 ± 1,3
25	1888,5 ± 1,3	43,5	1848,6 ± 1,3	62	1810,2 ± 1,3
25,5	1888,2 ± 1,3	44	1847,6 ± 1,3	62,5	1808,7 ± 1,3
26	1887,6 ± 1,3	44,5	1846,5 ± 1,3	63	1808,2 ± 1,3
26,5	1886,5 ± 1,3	45	1845,7 ± 1,3	63,5	1807,1 ± 1,3
27	1885,4 ± 1,3	45,5	1844,1 ± 1,3	64	1806,4 ± 1,3
27,5	1884,3 ± 1,3	46	1843,1 ± 1,3	64,5	1805,6 ± 1,3
28	1883,2 ± 1,3	46,5	1842,3 ± 1,3	65	1804,6 ± 1,3

Tabla 18: Velocidad de propagación en concentración de 90% de glicerina

Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad de propagación (m/s)
10	1924,2 ± 1,4	28,5	1887,6 ± 1,3	47	1851,0 ± 1,3
10,5	1923,4 ± 1,4	29	1886,5 ± 1,3	47,5	1850,0 ± 1,3
11	1922,5 ± 1,4	29,5	1885,4 ± 1,3	48	1848,9 ± 1,3
11,5	1921,3 ± 1,4	30	1884,6 ± 1,3	48,5	1847,8 ± 1,3
12	1920,2 ± 1,4	30,5	1883,7 ± 1,3	49	1846,8 ± 1,3
12,5	1919,3 ± 1,4	31	1883,2 ± 1,3	49,5	1845,7 ± 1,3
13	1918,2 ± 1,4	31,5	1882,1 ± 1,3	50	1844,6 ± 1,3
13,5	1917,0 ± 1,4	32	1881,0 ± 1,3	50,5	1843,6 ± 1,3
14	1915,9 ± 1,4	32,5	1879,9 ± 1,3	51	1842,5 ± 1,3
14,5	1915,0 ± 1,4	33	1879,0 ± 1,3	51,5	1841,5 ± 1,3
15	1914,2 ± 1,4	33,5	1878,5 ± 1,3	52	1840,1 ± 1,3
15,5	1913,3 ± 1,4	34	1877,7 ± 1,3	52,5	1839,3 ± 1,3
16	1912,7 ± 1,4	34,5	1876,6 ± 1,3	53	1838,3 ± 1,3
16,5	1911,9 ± 1,4	35	1875,7 ± 1,3	53,5	1837,2 ± 1,3
17	1911,0 ± 1,4	35,5	1874,9 ± 1,3	54	1835,9 ± 1,3
17,5	1909,9 ± 1,3	36	1873,8 ± 1,3	54,5	1834,9 ± 1,3
18	1908,5 ± 1,3	36,5	1873,0 ± 1,3	55	1833,8 ± 1,3
18,5	1907,3 ± 1,3	37	1872,2 ± 1,3	55,5	1832,8 ± 1,3
19	1906,2 ± 1,3	37,5	1871,3 ± 1,3	56	1831,7 ± 1,3
19,5	1905,0 ± 1,3	38	1870,5 ± 1,3	56,5	1830,7 ± 1,3
20	1903,9 ± 1,3	38,5	1869,7 ± 1,3	57	1829,6 ± 1,3
20,5	1902,8 ± 1,3	39	1868,9 ± 1,3	57,5	1828,6 ± 1,3
21	1901,9 ± 1,3	39,5	1867,5 ± 1,3	58	1827,3 ± 1,3
21,5	1901,1 ± 1,3	40	1866,4 ± 1,3	58,5	1826,2 ± 1,3
22	1900,2 ± 1,3	40,5	1865,3 ± 1,3	59	1825,2 ± 1,3
22,5	1899,4 ± 1,3	41	1864,3 ± 1,3	59,5	1824,1 ± 1,3
23	1898,5 ± 1,3	41,5	1863,2 ± 1,3	60	1822,8 ± 1,3
23,5	1898,0 ± 1,3	42	1862,1 ± 1,3	60,5	1821,5 ± 1,3
24	1897,1 ± 1,3	42,5	1861,0 ± 1,3	61	1820,3 ± 1,3
24,5	1896,3 ± 1,3	43	1859,9 ± 1,3	61,5	1818,7 ± 1,3
25	1894,9 ± 1,3	43,5	1858,8 ± 1,3	62	1818,2 ± 1,3
25,5	1893,8 ± 1,3	44	1857,8 ± 1,3	62,5	1817,4 ± 1,3
26	1892,4 ± 1,3	44,5	1856,4 ± 1,3	63	1816,4 ± 1,3
26,5	1891,5 ± 1,3	45	1855,6 ± 1,3	63,5	1815,6 ± 1,3
27	1891,0 ± 1,3	45,5	1854,5 ± 1,3	64	1815,1 ± 1,3
27,5	1890,1 ± 1,3	46	1853,2 ± 1,3	64,5	1814,3 ± 1,3
28	1888,7 ± 1,3	46,5	1852,4 ± 1,3	65	1813,0 ± 1,3

Tabla 19: Velocidad de propagación en concentración de 100% de glicerina

### ANEXO III: Detalle de los resultados obtenidos (gráficas)

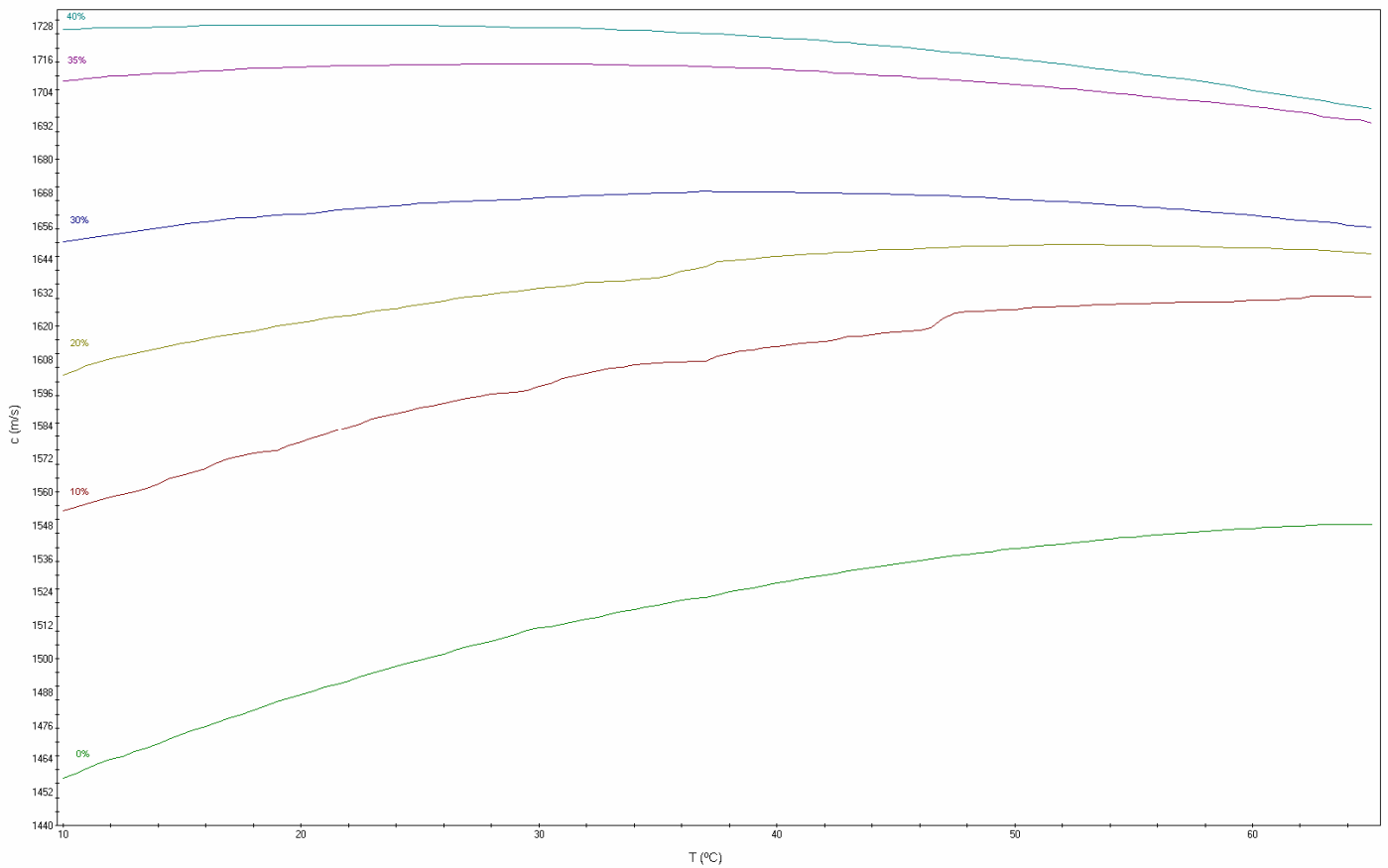


Figura 55: Curvas correspondientes a las concentraciones de 0, 10, 20, 30, 35 y 40% de glicerina.

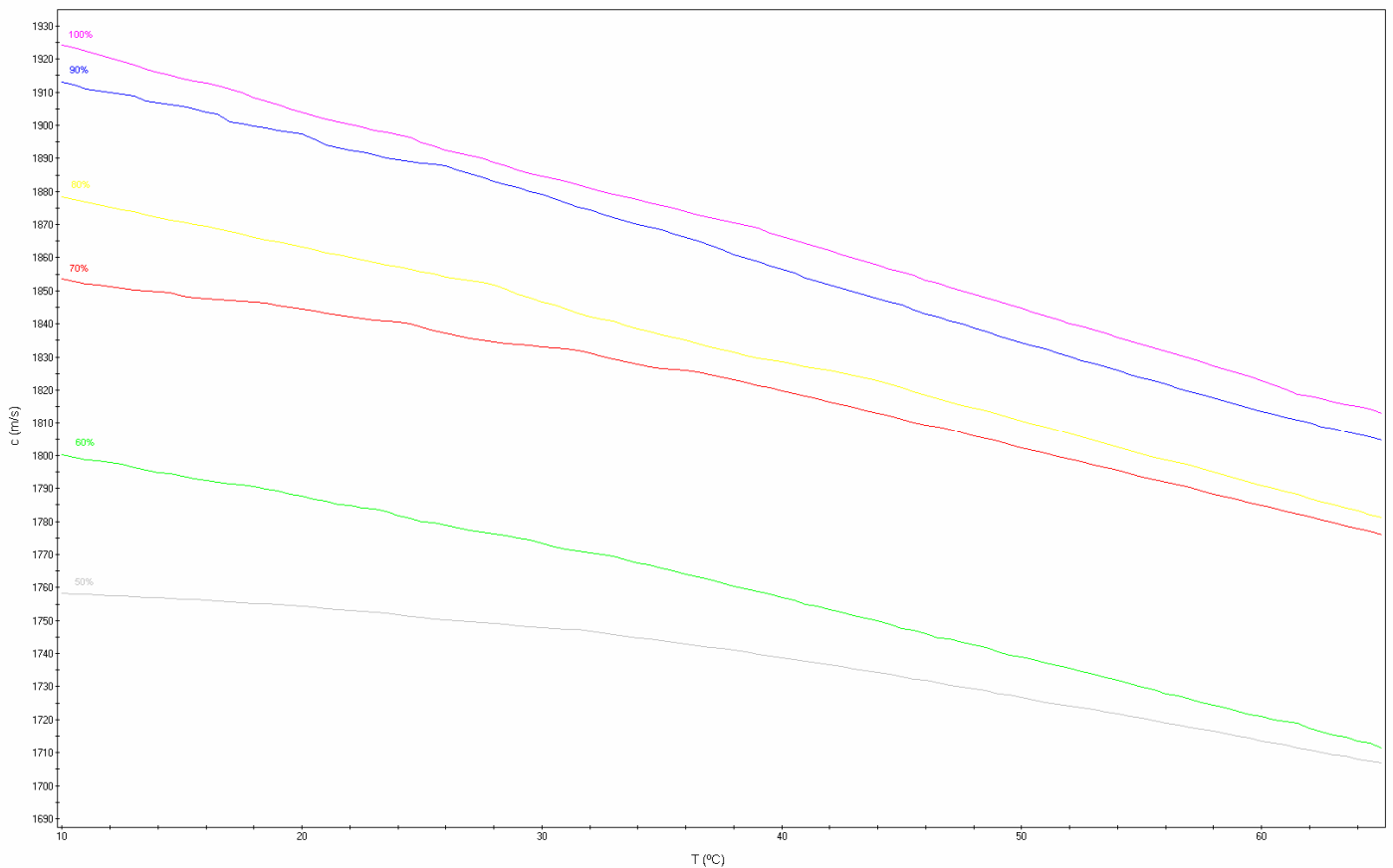


Figura 56: Curvas correspondientes a las concentraciones de 50, 60, 70, 80, 90 y 100% de glicerina.