

Universidad de Valparaíso  
FACULTAD DE CIENCIAS -DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
BIOMÉDICA



ESTUDIO DE IMÁGENES ELASTOGRÁFICAS DE ULTRASONIDO

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL BIOMÉDICO

CHERYL ANDREA LARA HERRERA

PROFESOR GUÍA: GUILLERMO AVENDAÑO  
PROFESOR CORRECTOR: CÉSAR GALINDO

Trabajo de  
Título 2.  
2011-1

2.

FECHA DE PRESENTACIÓN (JULIO, 2012)  
VALPARAÍSO – CHILE



*“Una tonelada de ciencia no vale más  
que una gota de sabiduría”.-*

**Pitágoras**

Dedico este trabajo a mis dos pilares;  
Luis Molina Burgos por ser una demostración de sabiduría y  
Margarita Herrera M. por ser un ejemplo de fuerza y constancia.



## Agradecimientos

En primera instancia quisiera agradecer al Profesor Guillermo Avendaño por su permanente disposición, apoyo, confianza, dirección en el presente trabajo y por haber proporcionado los medios necesarios para llevar a cabo las actividades propuestas en esta investigación. También quisiera expresar mi agradecimiento al Profesor Germán Blanchard por compartir sus conocimientos sobre mecánica, para el diseño y posterior fabricación del mecanismo de vibración. Sin lugar a dudas su contribución fue crucial en este trabajo.

Y un especial agradecimiento al Dr. Álvaro Covarrubias de la Unidad de Imagenología del Hospital Carlos Van Buren, por su valiosa cooperación en la adquisición de las imágenes de ultrasonido. En este mismo ámbito, agradezco al Comité Científico del Hospital Carlos Van Buren por aprobar la realización del estudio de imágenes elastográficas de ultrasonido en sus dependencias.

Finalmente agradezco a mi familia y amigos por su gran apoyo en todo este tiempo, sin duda han sido una gran fuente de aliento para lograr llegar a esta instancia. Igualmente agradezco a Christian Rojas M. por su constante e incondicional ayuda en los momentos de mayor necesidad.

Gracias a todos.



## Resumen.

### Resumen del trabajo:

El objetivo de este trabajo es dar a conocer una técnica que se está utilizando como complemento de tecnologías de mayor complejidad como es la resonancia magnética y el ultrasonido. Esta nueva técnica no invasiva es conocida como elastografía, donde su principal enfoque es observar la elasticidad de los tejidos frente a una aplicación mecánica en una determinada zona. Se han hecho hallazgos médicos donde el tejido canceroso en la mayoría de los casos es más denso. Cabe destacar que la elastografía se encuentra en su fase inicial, por lo que se han estado haciendo varias investigaciones y estudios para su implementación en el área clínica. Este trabajo en primera instancia se enfocará a investigar información sobre elastografía, para tener una visión completa de las investigaciones que se han hecho en otras aplicaciones referentes a esta temática. Posteriormente se pasará a una etapa de implantación en donde se construirá un prototipo de simulación de paciente con el principal objetivo de evidenciar la diferencia entre una imagen convencional de ultrasonido frente a una imagen de elastografía de ultrasonido.

Palabras claves: Elastografía de ultrasonido, Elastograma, Resonancia Estocástica.

# Tabla de Contenidos

## **RESUMEN**

---

11

## **INTRODUCCION**

---

11

OBJETIVOS

12

OBJETIVO GENERAL

12

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

12

## **ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA**

---

12

ESTADO DEL ARTE

12

ANÁLISIS DEL PROBLEMA

17

ESTUDIO DEL MARCO TEÓRICO

18

## **DESARROLLO DE LA PROPUESTA**

---

20

DISEÑO DE LA PROPUESTA

20

IMPLEMENTACIÓN

21

## **RESULTADOS**

---

27

RESULTADOS OBTENIDOS

27

ESTUDIOS DE VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA Y/O RESULTADOS

29

## **DISCUSIÓN**

---

30

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

30

## **CONCLUSIONES FINALES**

---

31

CONCLUSIONES

31

RESUMEN DE CONTRIBUCIONES

31

ALCANCE DE LAS CONTRIBUCIONES

32

INVESTIGACIONES FUTURAS

32

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

---

33

Trabajo de  
Título 2.  
2011-1

10

**GLOSARIO**

---

34

**ANEXOS**

---

35



# Estudio de Imágenes

## Elastográficas de Ultrasonido

Cheryl Andrea Lara Herrera

*Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad de Valparaíso, Chile*

**Palabras claves:** *Elastografía de ultrasonido, Elastograma, Resonancia Estocástica.*

**Resumen:** *El objetivo de este trabajo es dar a conocer una técnica que se está utilizando como complemento de tecnologías de mayor complejidad como es la resonancia magnética y el ultrasonido. Esta nueva técnica no invasiva es conocida como elastografía, donde su principal enfoque es observar la elasticidad de los tejidos frente a una aplicación mecánica en una determinada zona. Se han hecho hallazgos médicos donde el tejido canceroso en la mayoría de los casos es más denso. Cabe destacar que la elastografía se encuentra en su fase inicial, por lo que se han estado haciendo varias investigaciones y estudios para su implementación en el área clínica. Este trabajo en primera instancia se enfocará a investigar información sobre elastografía, para tener una visión completa de las investigaciones que se han hecho en otras aplicaciones referentes a esta temática. Posteriormente se pasará a una etapa de implantación en donde se construirá un prototipo de simulación de paciente con el principal objetivo de evidenciar la diferencia entre una imagen convencional de ultrasonido frente a una imagen de elastografía de ultrasonido.*

### 1. Introducción

Parte importante de la población mundial tiene o desarrollará algún tipo de tumor o cáncer, razón por la cual se han estado estudiando varios métodos para detectar tempranamente este problema. En el último tiempo apareció una nueva técnica llamada elastografía, que exhibe la elasticidad de los tejidos de manera simple y que ha tenido buenos resultados en diversas investigaciones, incluso sustituyendo a la biopsia en algunos casos. Muchas de las alteraciones patológicas están asociadas con cambios en la rigidez de los tejidos, ejemplo de ello son los ganglios linfáticos, epidermis, próstata, mamas y región abdominal. Es así que investigar todo lo referente a la elastografía se convirtió en la principal motivación de este trabajo, ya que esta nueva técnica tiene directa relación con uno de los temas más estudiados y analizados en el último tiempo que es el cáncer y los tumores.

En la actualidad es un problema recurrente que no existan dispositivos para medir aspectos tan relevantes como las propiedades mecánicas de la piel, incluso hay limitaciones en cuanto a la accesibilidad y profundidad de la medición. Las técnicas tradicionales de mayor complejidad no entregan información de la elasticidad de los tejidos, es por esto que todavía se utiliza la palpación como medio de diagnóstico. Pero este método tradicional llamado palpación es limitado, puesto que muchas veces los tumores ya sea por su tamaño o por su ubicación escapan a la detección de esta técnica. Aun así la palpación se utiliza porque la mayoría de las variabilidades patológicas se asocian con cambios en la rigidez de los tejidos. Desde hace algún tiempo se ha estado desarrollando la elastografía como una técnica que muestra la elasticidad de los tejidos a través de una forma no invasiva y que abarca zonas más profundas del cuerpo. Cabe destacar que la elastografía por ultrasonido es un fenómeno en el cual la respuesta de un sistema dinámico a una perturbación externa es optimizada por la presencia de un cierto nivel de ruido, a esto se le conoce como Resonancia Estocástica.

En este trabajo en primera instancia se hará un análisis sobre la elastografía de manera de entregar una información amplia tanto en su fundamento como en los avances que ha tenido en el último tiempo. Posteriormente se pasará a una etapa de implementación, en donde se pretende obtener imágenes de elastografía a través de un prototipo de simulación de manera de evidenciar la mejoría de esta técnica con respecto a una imagen tradicional.

### 1.1. *Objetivos:*

#### 1.1.1. *Objetivo General*

Comparar las imágenes de ultrasonido convencional con las imágenes de elastografía de ultrasonido, a través de un prototipo de simulador de paciente con el fin de evidenciar la mejoría de una con respecto de la otra.

#### 1.1.2. *Objetivos Específicos*

- i. Analizar la literatura existente sobre la elastografía de ultrasonido.  
Indagar y recopilar información relevante sobre los estudios e investigaciones realizadas con respecto a la elastografía de ultrasonido.
- ii. Construir un dispositivo piloto de simulación de paciente para ser utilizado en la validación de imágenes elastográficas.  
Este dispositivo de prueba estará hecho de acrílico en su parte exterior y relleno con glicerina y gelatina. Cabe destacar que la finalidad de la construcción de este dispositivo es la comparación entre imágenes de ultrasonido y elastografía de ultrasonido.
- iii. Obtener imágenes elastográficas de ultrasonido a partir del prototipo de simulación de paciente y el ultrasonido.  
Utilizando el ultrasonido y haciendo vibrar el prototipo a una cierta frecuencia se generarán instancias adecuadas para lograr imágenes elastográficas de ultrasonido. Posteriormente se examinarán las imágenes

obtenidas del ultrasonido pre y post aplicación mecánica sobre el prototipo de manera de comparar y comprobar la mejoría de las imágenes elastográficas frente a las imágenes convencionales de ultrasonido.

## 2. Análisis de la problemática

### 2.1. *Estado del Arte.*

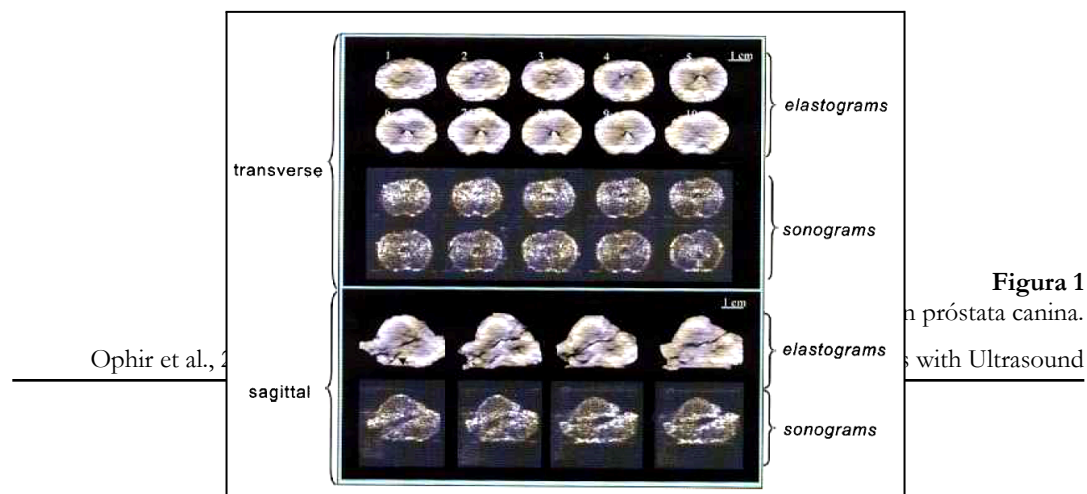
Para poder comprender la importancia sobre esta nueva técnica de diagnóstico de proyección de imagen, se iniciará este Estado del Arte mencionando los primeros acontecimientos que se realizaron respecto a elastografía. Aquí se darán a conocer algunos resultados relevantes y en algunos casos se mostrarán imágenes que reflejen la mejora de esta técnica. Posteriormente se indicarán algunas de las investigaciones realizadas en diversos países, destacando el avance que ha tenido la elastografía en otros lugares del mundo y que en Chile es un tema nuevo.

Hace varios años atrás se han estado realizando numerosas investigaciones para caracterizar las propiedades mecánicas de los sistemas de tejidos biológicos. Esto comenzó en el año 1969 con Fukaya et al. y Gale, luego en el año 1970 con Yamada, posteriormente en 1973 con Bakke, después en 1975 con D'Angelo y así sucesivamente con Harley et al. en 1977, en 1989 con Malinauskas et al., en 1993 con Sarvazyan, en 1996 con Chen et al. y Gao et al. De este modo la mayoría de los trabajos se centraron en los huesos, materiales dentales y tejido vascular. Otros artículos trataron sobre métodos utilizados para caracterizar estos tejidos, y existe un gran volumen de datos experimentales sobre el comportamiento mecánico de los tejidos con diversos tipos de carga. Ejemplos claros son los de; Demiray en 1972, Krouskop et al. en 1987, Céspedes et al. en 1993, Gao et al. en 1996 y Ophir et al. en 1991, 1996 y 1997. Algunas de estas investigaciones hablan de cómo los tipos de estímulos mecánicos deben ser propagados en el tejido, y de cómo deben ser previstos los medios de precisión para la detección de los movimientos internos del tejido resultante. Estos medios pueden incluir ecografía, resonancia magnética o algún otro medio de diagnóstico por imágenes con otras modalidades que puedan seguir el movimiento del tejido minuto a minuto con una alta precisión. En el último tiempo el interés ha ido en aumento con respecto a la proyección de imagen ultrasónica de la elasticidad de tejido o rigidez de éste. (Ophir et al., 2002)

El Sr. Jonathan Ophir fue uno de los primeros investigadores sobre elastografía, ya en 1994 patentó un equipo para la medición y proyección de imagen elastográficas de ultrasonido (Anexo 1), a través del cual mejoró el método de eco-pulso de ultrasonido y creó un equipo que tiene una particular aplicación en la toma de medidas de precisión de compresibilidad en cualquier material de retrodispersión, en particular en los tejidos orgánicos. El método emplea un transductor estándar que contiene el dispositivo, con lo que la compresión o el desplazamiento de una región proximal de

un cuerpo blanco son pequeños incrementos conocidos. En cada incremento, un pulso es emitido y luego una secuencia de eco (una línea) se detecta en las regiones dentro del objetivo. Este método proporciona información relativa y cuantitativa relacionada con la tensión causada por las compresiones. El estrés impartido por el transductor y que contiene el dispositivo también está determinado, corregido en función de la profundidad a lo largo de la ruta de sonido. Los valores para el estrés se dividen en los valores respectivos para la tensión a lo largo de cada ruta de acceso para obtener un elastograma, o una matriz de valores de compresión. (Ophir et al., 1994)

Los primeros resultados de visualización elastográfica se aprecian en la Fig. 1, donde se muestra una próstata canina in vitro. En la imagen se aprecia en el elastograma el blanco del borde (rígido), representados en ambos puntos de vista transversal y sagital, que corresponde a la glándula externa que rodea a una más suave glándula interior (Gris), la luz de la uretra está representado en forma de "V" o "U" (negro). Comparativamente, en el sonograma no proporciona una clara visualización de la estructura anatómica en la próstata, cabe señalar que estas imágenes fueron obtenidas a partir de 1mm equidistantes con cortes sagitales y transversales de una próstata canina de tamaño 3 x 3 x 3 cm aprox., aplicando una frecuencia de 5 MHz. Los elastogramas se muestran utilizando un mapa invertido de escala de grises donde el blanco son medios duros y el negro los medios blandos. (Ophir et al., 2002)



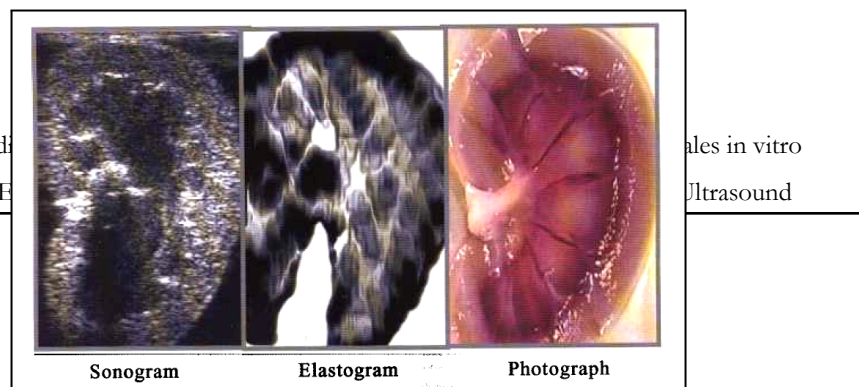
Otro caso visualización in vitro es la arquitectura del tejido normal, un riñón de una especie ovina como se muestra en la Fig.2. En esta figura a la izquierda se ve la imagen de ecografía, al centro el elastograma y a la derecha una fotografía. Es evidente que elastografía puede ser capaz de demostrar las estructuras normales del tejido, como las pirámides y columnas de Bertin, que a diferencia del sonograma estas no están bien visualizadas. A partir del elastograma se puede interpretar las estructuras que son consistentes como rígido de color negro que corresponde a la corteza renal y las

pirámides medulares (se observan 7), más suaves de color blanco que son las columnas de Bertin y muy suave zonas adiposas en la base de las columnas en el seno renal. (Ophir et al., 2002)

La primera aplicación In Vivo de elastografía fue la proyección de imagen de la mama y el músculo esquelético. En la Fig. 3 se muestra la visualización de carcinoma de mama, aquí se aprecia el tamaño de la lesión en el elastograma es mayor en comparación con el sonograma. El elastograma también representa una segunda lesión mucho menor que en el sonograma no se apreciaba, posteriormente ambas lesiones fueron confirmadas patológicamente. Algo a destacar a partir de los resultados obtenidos es que la diferencia de los tumores de mama benignos y cánceres fueron consistentemente más grandes en la elastograma en comparación con su tamaño correspondiente en el sonograma. (Ophir et al., 2002)

Con respecto a la elastografía se puede mencionar que las grandes mejoras en la calidad de la imagen se deben principalmente a la comprensión de la teoría de las imágenes elastográficas, por lo que se ha puesto más afán en varios países en encontrar nuevos algoritmos que procesen las imágenes elastográficas. Dando así paso al desarrollo de nuevas investigaciones y métodos de obtención de imágenes en las diversas partes del cuerpo humano. Cabe destacar que la elastografía se acopla muy bien a equipos de mayor complejidad como es el caso de la Resonancia Magnética y el ultrasonido, es así que la información que se obtiene a partir de esta fusión de tecnologías es superior a la hora de diagnosticar patologías. A continuación se exponen los diferentes estudios que se han hecho en el último tiempo en diversos lugares del mundo tanto para elastografía de ultrasonido como para la elastografía de Resonancia Magnética.

**Figura 2**  
Sonograma longitudi  
Ophir et al., 2002. E



**Figura 3**

De izquierda a derecha sonograma y elastograma comparación de carcinomas de mama in vivo (5 MHz)

Ophir et al., 2002. Elastography: Imaging the Elastic Properties of Soft Tissues with Ultrasound

---

En Suiza se han estado desarrollando diversas técnicas relativas a la salud y enfermedad de los tejidos, siendo la elastografía una de las que más destaca. Esta técnica consiste en imágenes basadas en la deformación del tejido en respuesta a una fuerza aplicada. Al momento de analizar las imágenes elastográficas se está utilizando un software comercial creado para su uso clínico, aunque éste tenga una orientación limitada con respecto de cómo aplicar los métodos útiles para el diagnóstico significativo. Una de las modalidades de imágenes más utilizada clínicamente son las de ultrasonido y las de resonancia magnética. (Li y & Snedeker, 2010)

Otro ejemplo de investigación es el caso del Dr. Richard Ehman y su equipo en EEUU, que desarrollaron una técnica de imágenes que da información precisa acerca de la dureza o elasticidad del hígado, esta técnica es de carácter no invasivo y es conocida por el nombre de elastografía por resonancia magnética (ERM). Esta técnica consiste en generar ondas transversales dentro del hígado a través de un vibrador plano parecido a un tambor que se colocaba en la pared abdominal. Luego para obtener las imágenes de las ondas, estas son capturadas y analizadas con un algoritmo especialmente desarrollado para el proceso de ERM. El algoritmo interpreta las imágenes de las ondas en un mapa cuantitativo de la dureza del tejido, este método se demora 15 segundos en obtener las imágenes para generar el elastograma. La ERM se está utilizando para investigación en el Centro de Cáncer M.D Anderson de la Universidad de Texas en Houston, la Universidad de Wisconsin en Madison, entre otras universidades de EEUU. Los resultados mostraron que los tumores malignos eran más duros que los tumores benignos y que el tejido hepático normal. La ERM se ha utilizado sólo para el hígado, por lo que se están empezando a realizar más estudios a otras áreas del cuerpo con la misma técnica. (Richard, 2008)

En Argentina hace muy poco se está aplicando la elastografía acoplada al ultrasonido y a la resonancia magnética de manera de obtener las propiedades viscoelásticas del hígado. Una enfermedad que últimamente ha sido investigada por elastografía es la enfermedad hepática grasa no-alcohólica (EHGNA), la que se caracteriza por una excesiva acumulación de grasa hepática en ausencia de consumo de alcohol. El diagnóstico de EHGNA es difícil ya que gran parte de los pacientes son asintomáticos y muchos de ellos son descubiertos durante una evaluación por otra patología como obesidad, diabetes, hiperlipemia o hipertensión. Pero esta técnica aun es demasiado

costosa y sólo está disponible en centros especializados. (Osta, Gastaldi, & Trifone, 2008)

Al momento de diagnosticar fibrosis hepática se utiliza en la mayoría de las veces la biopsia, pero esta no se puede utilizar para hacer un seguimiento de la progresión de la enfermedad. En China estudios de resonancia magnética funcional como método no invasivo, se ha convertido en lo más utilizado para la detección de fibrosis hepática, sin embargo aseguran que sólo la resonancia magnética elastográfica ha sido capaz de diagnosticar la etapa leve o fibrosis. (Wang & Zhang, 2010)

Estudios han revelado que una de las categorías más difíciles de detectar por ultrasonido son los nódulos menores de 3 cm, lo que dificulta su posterior diagnóstico del carcinoma hepatocelular (HCC, hepatocellular carcinoma). En Rumania se evaluó en tiempo real la sonoelastografía como una herramienta no invasiva para el diagnóstico de pequeños nódulos en pacientes cirróticos. Este estudio se aplicó a 42 pacientes cirróticos con 58 nódulos de tamaño entre 1 a 3 cm, estos fueron evaluados por elastografía en tiempo real y se llegó a la conclusión de que la elastografía por ultrasonido es un método prometedor para el diagnóstico no invasivo de principio de HCC. (Gheorghe et al., 2009)

En Suiza se han hecho investigaciones sobre la amiloidosis hepática con respecto al aumento de la rigidez hepática, siendo medida a través de elastografía transitoria (TE). Los valores de la rigidez en elastografía transitoria tienen que ser interpretados con precaución, ya que los factores tales como la esteatosis (acumulación anormal de grasa), la congestión, inflamación aguda y colestasis extrahepática puede influir en las mediciones. Los depósitos de amiloide puede aumentar la rigidez del parénquima hepático provocando que sean mayores los valores de rigidez hepáticos. Es así que se llegó a la conclusión que los resultados de elastografía transitoria deben ser siempre interpretados en su contexto clínico. (Janssens et al., 2010)

La distrofia muscular congénita incluye una serie de enfermedades genéticas caracterizadas por debilidad muscular y contracturas. En Grecia se hizo un estudio al muslo de un niño de 15 años aplicando resonancia magnética, ultrasonido y elastografía por ultrasonido en tiempo real. Los resultados que arrojaron los elastogramas, es decir, las imágenes elastográficas de ultrasonido fueron correlacionados con los datos de Resonancia Magnética y los de ultrasonido. De este modo se reafirma la idea que la elastografía por ultrasonido podría ser utilizada como una herramienta de imagen adicional para evaluar el patrón de los cambios musculares en la miopatía congénita. (Drakonaki & Allen, 2010)

Una técnica de imagen altamente utilizada para la evaluación de la próstata es la ecografía, es por esto que al momento de realizar una biopsia de esta zona se hace bajo el control ecográfico. Actualmente las nuevas técnicas de imagen permiten la visualización mejorada en la detección del cáncer de próstata, un ejemplo claro de esto ha sido la evolución de los métodos de contraste de color realzando el Doppler, la

ecografía con contraste específico y la elastografía. Es así que se ha llegado a la conclusión de que se puede cambiar el papel actual de la ecografía por un método que entregue una mejor visualización para el diagnóstico de cáncer de próstata. Esta investigación realizada en Austria se basa de una revisión general que se hizo con respecto a la ecografía y sus diferentes técnicas para obtener imágenes de la próstata, de manera de discutir las tendencias actuales y futuras. (Mitterberger et al., 2010)

Con respecto a las imágenes reconstructivas de elastografía de ultrasonido es posible que se usen para diagnosticar y vigilar la cicatrización, la inflamación y el edema en el uso de trasplante de riñón. Según un estudio realizado en EEUU se esperaba que la elasticidad de los riñones cambiara drásticamente con la cicatriz y en menor medida con la inflamación aguda y edema. Estos cambios de elasticidad fueron monitorizados con estimaciones precisas de los desplazamientos internos y de tensión, que posteriormente fueron reconstruidas gracias al modulo de Young. Los resultados de este estudio afirman que las imágenes de elasticidad de ultrasonido pueden detectar cambios en la elasticidad de estructuras complejas, como en el caso del riñón. Otra conclusión a que se llegó es que esta técnica tiene el potencial para convertirse en una herramienta importante para el diagnóstico clínico de trasplante renal. (Emelianov et al., 2000)

Años atrás se introdujo la ecografía endoscópica en la práctica clínica con el fin de visualizar mejor el páncreas, pero cuando apareció la elastografía de ultrasonido esta fue superior a los demás métodos en la detección de masas pancreáticas. La principal característica de esta técnica era que tenía la capacidad de diferenciar entre lesiones benignas y malignas de páncreas a partir del tipo de tejido. En Croacia consideran que la elastografía de ultrasonido (EUS) es un método valioso en la evaluación de masas solidas del páncreas y que al momento de punción guiada por EUS es la mejor técnica para la obtención del diagnóstico del tejido. (Tadić et al., 2010)

En Alemania se hizo un estudio a 779 pacientes para evaluar si la sonoelastografía mejora la diferenciación de las lesiones mamarias benignas y malignas. En este estudio se enfocó en parámetros tales como la sensibilidad (SE), especificidad (SP), el valor predictivo positivo (VPP) y valor predictivo negativo (VPN). Los resultados obtenidos fueron que la sonoelastografía demostró una mejora en la especificidad y un excelente en el valor predictivo positivo en comparación con la ecografía en modo B. Por lo que se concluye que el uso complementario de sonoelastografía definitivamente mejora el rendimiento en el diagnóstico de mama. (Wojcinski et al., 2010)

Como se puede apreciar ha habido más resultados positivos con respecto a los análisis que se realizaron al hígado en temas de rigidez, es por esto que hace muy poco salió al mercado un producto llamado FibroScan® que mide de forma no invasiva la rigidez hepática. Este equipo posee un transductor que genera una vibración controlada con una frecuencia (50Hz), utiliza un ultrasonidos de baja frecuencia 3,5 Hz y el volumen explorado es de 3cm, con una profundidad de 15 a 75mm. La rigidez detectada en el hígado se ve reflejada en el elastograma para luego ser analizada por un especialista (<http://www.echosens.com>).

Constantemente están apareciendo publicaciones de elastografía sobre estudios aplicados a diversos órganos del cuerpo y con posibles aplicaciones clínicas, que hacen que el análisis sea lo menos invasivo y por ende menos incómodo para el paciente. Sin duda esta nueva técnica ha sido un gran hallazgo en la historia biomédica.

## 2.2. *Análisis del Problema*

Desde hace algún tiempo que se ha comprobado a través de investigaciones que la gran mayoría de los cambios patológicos en el cuerpo se asocian con cambios de elasticidad en los tejidos. De hecho, el cuerpo humano es capaz de producir una variedad enorme de crecimientos anormales o inflamaciones (tumores) que son totalmente inofensivos. La gran ventaja de este tipo de tumores inofensivos es que son más suaves que los tumores cancerosos, un ejemplo de ello es el caso del tumor de mama donde un tumor benigno es de 5 a 100 veces más flexible que uno maligno (Layton, 2006).

En la actualidad ninguna de las técnicas clásicas de exploración del cuerpo humano cotidianamente empleadas ofrece información directa de la elasticidad de los tejidos, por ejemplo los equipos de Rayos X ofrecen información acerca del grado de absorción de una radiación electromagnética en los diferentes tejidos y a través de ello se permite distinguir estructuras potencialmente malignas. Debido a esta situación de equipos que entregan información limitada es que en reiteradas ocasiones se emplea la palpación como medio de diagnóstico, generalmente este método es utilizado para detectar el cáncer de próstata a través del descubrimiento de una dureza en la zona examinada. Suele suceder que muchas veces la zona a examinar puede ser demasiado pequeña o estar situada profundamente en el cuerpo como para ser detectados y evaluados por los métodos estándar de la palpación. Una situación clara que escapa a la palpación es el caso de las regiones de infarto de miocardio o endurecido de las arterias (Bamber, 1999). La única técnica conocida que entrega información detallada es la biopsia, pero como es de carácter invasivo solo se utiliza en casos cuando se sospecha de alguna patología.

Hace algunos años se han estado probando nuevas técnicas para la detección de zonas más densas, una de las más destacadas y que ha tenido buenos resultados ha sido la elastografía. Esta técnica se basa en aplicar una fuerza ya sea interna o externa que hace que los tejidos más densos se muevan menos que los blandos. Sin embargo, este procedimiento aun se encuentra en fase de prueba para su futura aplicación clínica. Los equipos actuales que otorgan la posibilidad de complementar la técnica de elastografía son la Resonancia Magnética y el ultrasonido, con estas técnicas se pueden obtener imágenes antes y después de una compresión mecánica de los tejidos a estudiar. Aunque la Resonancia Magnética entrega información mucho más precisa, ésta tiene ciertas limitaciones en cuanto a coste y disponibilidad, al momento de poseer esta tecnología hay que cumplir una serie de condiciones en ámbitos de

instalaciones como espacio físico mínimo. Debido a esto el ultrasonido ha sido una opción más viable para obtener imágenes de elastografía, ya que esta se encuentra al alcance de muchos especialistas en razón de su bajo costo de instalación en comparación con la Resonancia Magnética (RM). La elastografía ha sido un giro para la técnica de ultrasonido tradicional ya que utiliza ondas sonoras para crear una imagen de lo que está pasando dentro del cuerpo, puede determinar si una masa es maligna o benigna en un instante. Por ello es que últimamente en numerosas investigaciones realizadas a pacientes se utiliza la elastografía, para diagnosticar rápidamente el cáncer de mama sin el uso de una aguja o un bisturí. Es una especie de mecánica como la palpación pero llevado al siguiente nivel: digital, muy fiable y no es afectado por la profundidad del tumor. (Layton, 2006)

A partir de lo mencionado anteriormente la alternativa que compete para detectar tempranamente alguna patología es a través de la elastografía por ultrasonido, ya que su método no invasivo hace que sea menos doloroso para el paciente y porque su costo de implementación es más bajo que la elastografía por Resonancia Magnética.

### 2.3. *Estudio del Marco Teórico.*

La elastografía es una técnica que mejora la visualización de las imágenes adquiridas por equipos de mayor complejidad tales como el ultrasonido y la Resonancia Magnética, siendo el primero más utilizado por ser de fácil acceso a diferencia del segundo. Cabe mencionar que esta técnica aplica una acción mecánica en la zona de estudio, provocando que las áreas más densas se muevan menos que el resto. De este modo la elastografía proviene del mismo principio que la definición de elasticidad de un material, que se refiere a la resistencia del material a ser deformado ante la aplicación de una fuerza.

Es importante a destacar que la elastografía por ultrasonido es una Resonancia Estocástica, es decir, un fenómeno en el cual la respuesta de un Sistema Dinámico a una Perturbación Externa es optimizada por la presencia de un cierto nivel de Ruido. (Calisto, Mora & Tirapegui, 2008)

Para comprender mejor la elastografía de ultrasonido se debe conocer cómo funciona un ultrasonido tradicional. Esta técnica de imagen médica usa los ecos producidos por las ondas sonoras de alta frecuencia para construir una imagen del cuerpo interior, al momento que una onda sonora choca con un objeto, eso se refleja y se le conoce como eco, luego esta información es capturada por el transductor del ultrasonido. El equipo puede armar una imagen de lo que las ondas sonoras están golpeando, a estas imágenes se le conocen como sonogramas y se forman a través de un software que procesa la información de los ecos de las ondas sonoras. La elastografía hace lo mismo, pero agrega otra dimensión a la mezcla que es la compresión o la vibración y a estas imágenes se les conocen como elastogramas. En resumen los sonogramas entregan información relacionada con la dispersión de energía acústica mientras que los elastogramas lo hacen acerca de determinadas características elásticas. (González Fernández J. 2006)

La elastografía por ultrasonido es una técnica que está basada en la estimación de los desplazamientos de los tejidos por análisis de las imágenes adquiridas de equipos de ultrasonidos tradicionales, de tal manera que los tejidos están sometidos a una compresión o vibración mecánica externa. La elastografía puede ser aplicada a cualquier tejido del sistema que sea accesible por el ultrasonido y que pueda ser sometido a una pequeña compresión externa o internamente. Incluso los fenómenos fisiológicos pueden ser utilizados como una fuente de la compresión del tejido, tales como pulsaciones de arterias o la respiración. (Ophir et al., 2002)

Existen varios métodos para imágenes de elasticidad de los tejidos basados en ultrasonido, los cuales se dividen en dos grupos:

- 1.- *Métodos de compresión* que se aplica una compresión a los tejidos y los componentes resultantes de la tensión de deformación son estimados.
- 2.- *Métodos de vibración* en donde se aplica una vibración de baja frecuencia (<1KHz) a los tejidos, y los comportamientos de los tejidos son inspeccionados por ultrasonidos o por medios acústicos. (Ophir et al., 2002)

Dentro del grupo del método de compresión existen varias maneras de estimar las deformaciones, una de las más utilizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales sólidos es el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Pero al ser estas ecuaciones lineales escapan a la realidad de los tejidos ya que en general los tejidos blandos son anisótropos, viscoelásticos y no lineales. Sin embargo, para simplificar el análisis se suele suponer que para pequeñas tensiones se comportan como isotropos, elásticos y lineales. Es así que para estas respuestas presentan una relación lineal entre tensión y deformación. De esta manera la respuesta de los tejidos a los estímulos externos pueden modelarse por dos constantes; el modulo de Young E, y la relación de Poisson  $\nu$  de la forma que muestran las ecuaciones I y II. (González Fernández J. 2006)

$$E = \frac{\text{Tensión Aplicada}}{\text{Deformación unitaria}} \quad \text{Ecuación I} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\text{Deformación lateral unitaria}}{\text{Deformación axial unitaria}} \quad \text{Ecuación II} \quad (2)$$

Un punto relevante a destacar es que en elastografía lo que interesa es medir la proporcionalidad entre tensión aplicada y deformación por unidad de longitud (deformación unitaria) (1). Y luego la magnitud que se observa se calcula de la deformación absoluta de las diferentes estructuras que componen el tejido (2).

También existe otro tipo de estimación en una dimensión llamada “Deformación Axial Longitudinal”, que consiste en el análisis de señales ultrasónicas retrodispersadas obtenidas a partir de un equipo de diagnóstico estándar de ultrasonido. Esta estimación pretende medir los desplazamientos de los diferentes puntos que

conforman la imagen cuando se aplica una deformación conocida, además esta se lleva a cabo mediante la adquisición de un conjunto de digitalización de frecuencias radioeléctricas de las líneas de eco contenidas en la región de interés del tejido. Cuando uno o más de los elementos del tejido tiene una rigidez diferente al parámetro, el nivel de tensión en el elemento por lo general será más alto o más bajo, es decir, en un elemento como un tejido rígido en general experimentará menos tensión que uno más suave.

La estimación por deformación axial longitudinal permite que se pueda comprimir el tejido con el transductor de ultrasonidos a lo largo del eje de la radiación ultrasónica en una pequeña cantidad, por lo general alrededor del 1% o menos de la profundidad del tejido total. Posteriormente se obtiene la adquisición de las post-compresiones a partir de las líneas de eco de la misma región de interés, estas líneas de eco se subdividen en pequeñas ventanas temporalmente para luego ser comparadas por pares mediante una variedad conocida. Una forma de hacer más eficiente este proceso es aplicar el retraso de tiempo a través de una técnica conocida como correlación cruzada, la cual consiste en estimar el instante de llegada de los ecos de antes y después de la compresión. Dado que es pequeña la magnitud de la compresión aplicada, también serán pequeñas las distorsiones de las líneas de eco y los cambios en los tiempos de llegada. (Ophir et al., 2002)

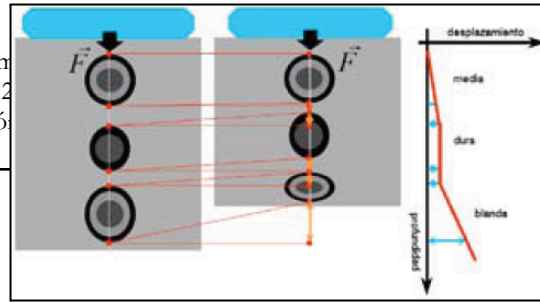
En la Fig. 4 se puede observar cómo se modifican las señales de ultrasonido cuando se produce una compresión en un tejido con diferentes regiones de distinta elasticidad. Las regiones que experimentan menos desplazamiento relativo a los puntos son más duras y las zonas más blandas son las que más se deforman y sufren mayor desplazamiento. Es decir, los desplazamientos en que se observa una mayor pendiente corresponden a regiones más blandas y las de menor pendiente a zonas duras. La imagen de deformaciones unitaria axiales se estima calculando la gradiente de los desplazamientos que los elementos de cada tejido experimentan bajo compresión. Estas estimaciones de desplazamientos se evalúan a partir de los retrasos en el tiempo de las señales ecográficas de antes y después de la compresión mecánica aplicada y se obtienen mediante una técnica llamada correlación cruzada, a partir de las señales de ultrasonido de antes y después de la compresión. (González Fernández J. 2006)

A continuación se mencionará uno de los procesos generales para crear los elastogramas a través de un diagrama de bloques, como se observa en la Fig. 5. El primer bloque corresponde a un objeto uniforme con un simple patrón circular, luego viene un bloque intermedio corresponde a la tensión ideal de distribución en el objetivo, posteriormente se muestra el resultado del comportamiento en relación con una carga de compresión. Este procedimiento puede ser calculado para objetos por la simple Función de Transferencia de Eficiencia en Contraste (CTE), es decir, la relación entre lo observado y el índice de tensión de contraste. Finalmente la salida de la imagen corresponde a la tensión (axial y/o lateral) de la imagen (elastograma). El ruido y las propiedades de contraste del elastograma son considerados a partir del Filtro de la Tensión (SF), que tiene en cuenta el procesamiento de las señales y

parámetros acústicos que dañan la imagen de la tensión ideal por lo que limita la calidad final del elastograma. (Ophir et al., 2002)

**Figura 4**

Relación entre desplazamiento y elasticidad.  
(González Fernández J. 2002)  
"Medida y caracterización de tejidos por imágenes"

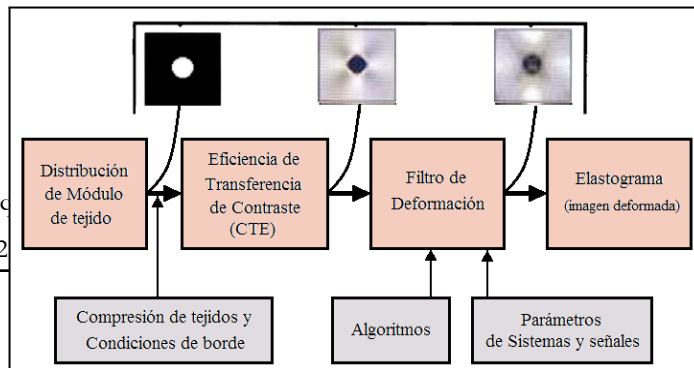


elasticidad.

ción a la medicina guiada

**Figura 5**

Diagrama de bloques  
Ophir et al., 2002



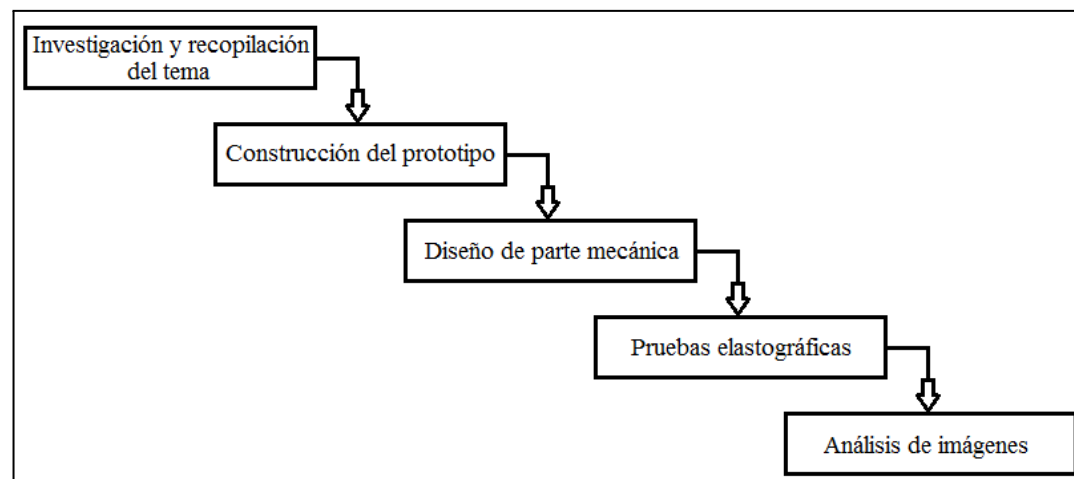
Ultrasound

### 3. Desarrollo de la propuesta

#### 3.1. Diseño de la Propuesta

Para cumplir con los objetivos específicos planteados en este trabajo se ha propuesto una metodología en cascada, es decir, que los procedimientos se ordenan en etapas bajo un enfoque secuencial. En la Fig. 6 se muestran las diferentes etapas. La primera fase consiste en realizar una investigación sobre el tema de elastografía, de manera de recopilar la información existente de los avances, resultados y posibles aplicaciones clínicas. Esta etapa es primordial para comprender todos los conceptos y variables que involucran a esta nueva técnica de proyección de imagen. Una vez analizada y

seleccionada la información de elastografía se pasará a la etapa de construcción del prototipo de simulación de paciente, donde su principal finalidad de construcción será evidenciar la diferencia entre las imágenes de elastografía de ultrasonido con las imágenes de ultrasonido convencional. Cabe destacar que la idea del prototipo surgió a partir del trabajo realizado por Castañeda (Castañeda, 2010), la diferencia de este trabajo con el de Castañeda es que los materiales a utilizar serán de sencilla obtención. Existen varios puntos a tener en cuenta al momento de realizar el prototipo de simulador de paciente, previamente deberá estar relleno con algún tipo de sustancia para evitar que se generen zonas de aire, esto es importante porque el ultrasonido al momento de emitir las ondas requiere de un medio para propagarse, es por esto que cualquier existencia de aire perjudicaría la adquisición de la imagen. Para poder continuar a la siguiente etapa que correspondería al diseño y construcción de la parte mecánica, antes se debe considerar algunos conceptos del prototipo construido como por ejemplo las dimensiones y peso de éste. Estas observaciones son relevantes ya que la parte mecánica debe ser capaz de mover el prototipo de simulación a una frecuencia baja para poder obtener imágenes elastográficas. Finalmente para poder cumplir con los objetivos de este trabajo y ya completada la etapa de la parte mecánica se pasará a la etapa de pruebas elastográficas, aquí se necesitará de un equipo de ultrasonido convencional más el prototipo de simulador de paciente y su soporte vibratorio para poder obtener las imágenes elastográficas. Y por último está la etapa de análisis de las imágenes adquiridas, en donde se examinarán en detalle las imágenes tradicionales de ultrasonido y las imágenes de elastografía de ultrasonido.



### 3.2. Implementación

Inicialmente este trabajo partió con una investigación y recopilación de datos sobre elastografía, de manera de entender la importancia de esta nueva técnica y como esta habría revolucionado el método de diagnóstico tradicional. En este proceso de

Indagación de información se buscó en internet en páginas web reconocidas científicamente, como PubMed que es un buscador de publicaciones y libros en línea, también se indagó en las patentes relacionadas con la técnica de elastografía. Es así que se encontraron varios estudios relevantes que dejaron ver que la técnica de elastografía era un método prometedor para el diagnóstico preventivo, lo más destacable fue el avance de este tema en diferentes partes del mundo. Una vez entendidas las variables que involucraban a la elastografía se procedió con la implementación de esta técnica, para esto se construyó un prototipo de simulación de paciente con el propósito de obtener imágenes elastográficas. Este prototipo se hizo a base de materiales de fácil adquisición, es decir, su soporte principal o estructura era de acrílico y en el interior poseía 3 componentes; un tubo transparente, varios cilindros unidos y un alambre (Fig. 7). Luego esta estructura en su parte interna fue rellenada con dos sustancias de diferentes densidades sugerido por el Profesor guía, en la parte inferior se colocó gelatina y en la zona superior se utilizó glicerina. La principal razón de utilizar dos componentes de diferentes densidades es que se puede evidenciar la diferencia de fases al momento de obtener las imágenes de ultrasonido. Posteriormente completado el proceso de rellenado como se muestra en la Fig. 8, se continuó con la obtención de las imágenes iniciales de ultrasonido. Para esto se hizo necesaria la utilización de un ecotomógrafo, por lo que la carrera disponía de un equipo pero por motivos de coordinación y tiempo esto no fue factible, así que se optó por buscar otro medio para obtener las imágenes iniciales de ecotomografía. Es por esto que se conversó con el Radiólogo Fernando Prokes del Hospital Claudio Vicuña de San Antonio para realizar esta tarea, el cual accedió a prestar la ayuda necesaria para obtener las imágenes iniciales del prototipo de simulación de paciente. En la Fig. 9 muestra el momento que el especialista está adquiriendo las imágenes iniciales de las estructuras internas del prototipo.

Figura  
Prototipo



**Figura 8**

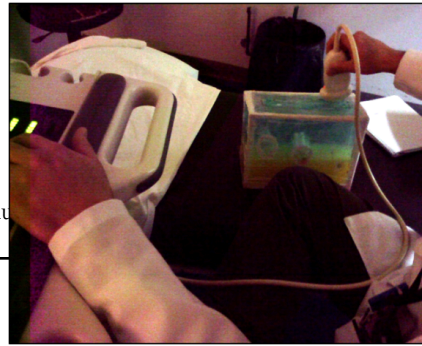
Prototipo de simulación con relleno de gelatina en su parte inferior y glicerina en su parte superior

---

**Figura**  
Obten  
Ferna



de Simu



Continuando con el trabajo correspondía seguir con la etapa del diseño y construcción del mecanismo de vibración, donde su principal propósito era hacer vibrar el prototipo a una frecuencia constante y así provocar las condiciones necesarias para obtener las imágenes de elastografía. En esta etapa se conversó con el Profesor Germán Blanchard especialista en mecánica, el cual para poder diseñar un método para agitar el prototipo él necesitaba saber el peso de la estructura, que aproximadamente eran 4 kilos. Considerando estos parámetros el Profesor diseñó una estructura con ruedas que soportará el prototipo de simulación y que este fuera gobernado por un motor, como se muestra en la Fig.10. De esta manera el movimiento sería en un eje a una frecuencia determinada por el giro del motor, es decir, al girar más rápido el motor el prototipo se agitaría más. El Profesor Germán Blanchard recomendó utilizar motor paso a paso o bien motor servo, para poder aplicar diferentes frecuencias de oscilación en el prototipo. Se optó por utilizar el motor paso a paso, ya que era este motor puede ser manejado por un driver y este a su vez puede ser dominado bajo un Microcontrolador. En el Laboratorio se consiguieron los materiales necesarios para llevar a cabo la construcción del diseño, aquí se obtuvieron el motor paso a paso P/N 1-19-4203 y el driver MC3479. Con la ayuda del Profesor Luis Togo Arredondo se pudo comprender mas sobre los motores paso a paso, algo que destaco fue que estos motores son ideales para la construcción de

mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. Para obtener un mejor funcionamiento del motor se ocupará la versión bipolar lo que permitirá que las bobinas siempre estén energizadas.

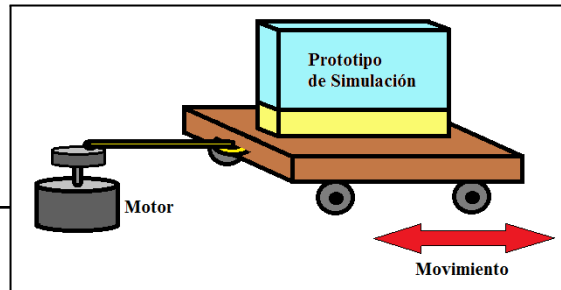


Figura 10  
mecanismo de vibración

Al momento de utilizar el motor paso a paso empezaron suceder una serie de complicaciones para su correcta implementación, entre una de ellas fue el no contar con un diodo específico Zener (1N5224-A), donde su principal función era mantener en 3V la entrada de uno de los pines del driver MC3479. Es por esto que se busco la alternativa de utilizar un motor unipolar, el cual poseía una configuración más simple que el motor paso a paso y además se contaba con los materiales para su implementación. Cabe destacar que esta parte del proceso se contó con la colaboración del Ingeniero Biomédico Pablo Fuentes. Para la configuración básica de accionamiento del motor unipolar este además debe tener un driver 35ZKFXA conectado a los 6 cables; 4 cables de bobina y 2 del común de las bobinas, como se muestra en la Fig. 11.

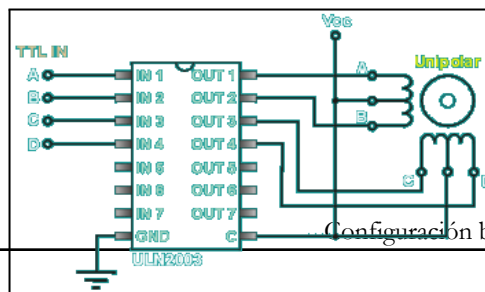


Figura 11  
Configuración básica de un motor unipolar

Para gobernar al driver 35ZKFXA en este caso se utilizo el Microcontrolador PIC16f877A, es por esto que la siguiente etapa fue hacer un programa y grabarlo en el integrado PIC16f877A a través de un PICkit. Es así que para el código del microcontrolador se utilizo el programa MiKroC, en primera instancia se uso una configuración simple con el fin de lograr que el motor diera una vuelta completa. Se

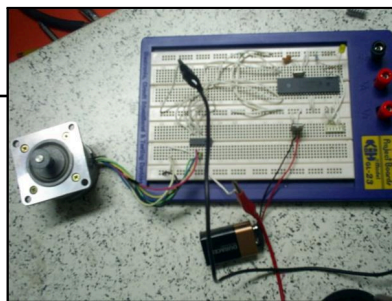
realizaron varias pruebas después de haber cometido varios errores, por ejemplo cuando el motor en el giro avanzaba 2 pasos y retrocedía 2, después de varios intentos se pudo evidenciar el problema que era por una mala conexión de los cables del motor en la salida del driver, haciendo que se energizaran bobinas opuestas y esto provocaba que diera 2 pasos y retrocediera 2. Al resolver esta situación el motor rotó normalmente incluso se hicieron pruebas de velocidad en el mismo programa en mikroC, donde se disminuía el delay para que aumentase la velocidad y además se cambió la configuración del programa por uno más robusto (Anexo 2) tal como se muestra en la Fig.12. Al utilizar esta configuración lo que se logró es que motor tuviera mayor fuerza, en la Fig.13 se muestra el circuito que se hizo para gobernar al motor unipolar.

Una vez concluida esta etapa del motor se procedió a montar la parte de la estructura con ruedas (carrito) para el sostenimiento del prototipo de simulación de paciente. Luego se unió el motor al carrito y se dispuso a hacer pruebas básicas, lo cual dio un resultado no satisfactorio ya que el carrito con el prototipo eran muy pesados y el motor apenas podía moverlo, como se muestra en la Fig.14. Por lo que se llegó a la conclusión de que este método no era óptimo ya que la vibración para el prototipo no funcionaría.

Al evidenciar esta experiencia que no fue satisfactoria se procedió a idear otro método para hacer vibrar al prototipo de simulación de paciente, es por esto que se volvió a solicitar la ayuda del Profesor Germán Blanchard. En esta ocasión hubo una conversación directa entre el Profesor Guía y el Profesor Germán Blanchard, por lo se pudo analizar en detalle la falla de la experiencia anterior realizada. Es así como se llegó a la conclusión de que la falla fue por no poseer elementos de mayor potencia, es por esto que se optó para este nuevo diseño utilizar un motor de una máquina de coser. Además se planteó que el nuevo diseño tuviera la posibilidad de cambiar la frecuencia de vibración.

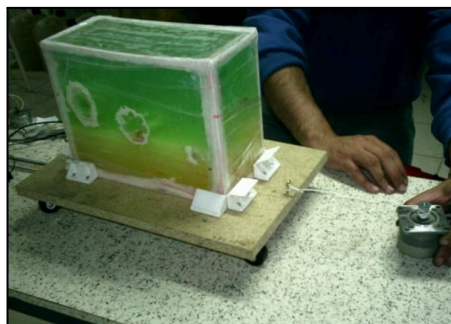
**Figura 12**  
Configuración

Paso	S1	S2	S3	S4
1	X	X		
2		X	X	
3			X	X
4	X			X
1	X	X		
Sentido antihorario (b)				



**Figura 13**

Construcción de circuito que gobierna al motor



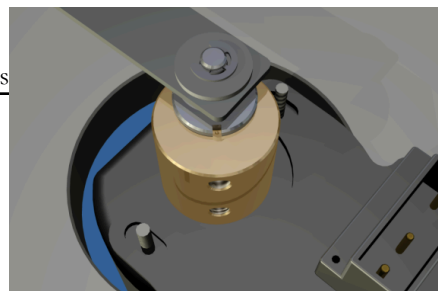
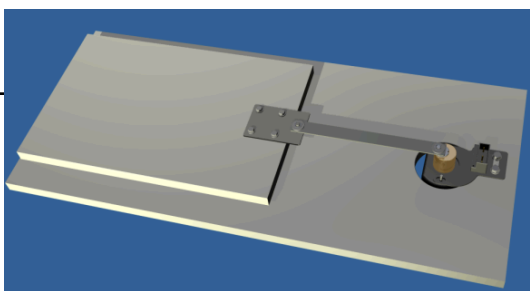
**Figura 14**  
Motor y carrito con prototipo de simulación

---

En paralelo a esta situación se probó las condiciones del equipo de ultrasonido que se encontraba en el laboratorio de la carrera Ingeniería Biomédica, el cual sería utilizado para obtener las imágenes elastográficas. Desafortunadamente este equipo de ultrasonido Acuson 128XP/10 no se encontraba en buenas condiciones, ya que cada vez que era encendido y realizaba su proceso de inicialización este se apagaba. Así ocurrió varias veces impidiendo poder hacer pruebas básicas con aquel equipo.

Con respecto al prototipo se encontraba en un estado no favorable, ya que en su parte inferior se produjo una pequeña abertura, la cual causó que la glicerina que se localizaba en la parte superior comenzara a filtrarse por esta grieta. A esta situación se tomó la decisión de eliminar todo el contenido para luego pasar a la etapa de sellado de la parte afectada. Para este proceso se utilizó adhesivo instantáneo y policarbonato transparente. Una vez ya arreglado el asunto de filtrado se volvió a llenar con gelatina en su parte inferior y glicerina en su parte superior, por lo cual el prototipo se encontraba listo para usarse.

En relación al nuevo diseño del mecanismo de vibración el Profesor Germán Blanchard solicitó las dimensiones del prototipo con el fin de saber el centro de gravedad de la estructura. Posterior a los datos solicitados el Profesor ideó una propuesta la cual consistía en un sistema a base de rieles y sobre este se pondría una plataforma en donde iría ubicado el prototipo, todo esto sería gobernado por un motor. Este nuevo diseño creado por el Profesor Germán Blanchard se aprecia en la Fig.15 y en la Fig.16, aquí se muestran las piezas que se mandaron a construir para este nuevo diseño. Con respecto a la Fig. 16 se muestran diversas piezas, una de ellas que se encuentra ubicada sobre el cilindro amarillo se llama eje de excentricidad variable, esta pieza se puede cambiar de posición con una llave Allen dejándola más cercana o alejada del centro, lo cual hará que la amplitud cambie y por ende la vibración será más rápida o más lenta.



a 15  
hard

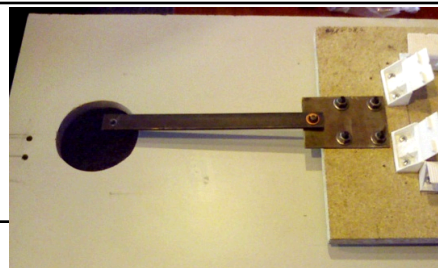
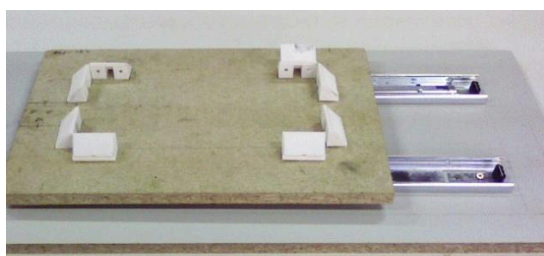
**Figura 16**

Imagen de las piezas que se mandaron a construir

Una vez obtenidos algunos materiales como los rieles telescópicos y la plancha de madera (largo 71,6 cm y ancho 32,5 cm) se dispuso a armar el nuevo diseño. En primer lugar se colocaron los rieles telescópicos como se muestra en la Fig. 17 y luego se hicieron perforaciones de 0,6 cm tanto en la tabla del prototipo como en la plancha con el fin de poner los pernos de ajuste. En la plancha de 71 cm se hizo un orificio de 7 cm de diámetro con el motivo de colocar el motor, esto se aprecia muy bien en la Fig.18.

**Figura 17**

Instalación de los rieles telescópicos en la plancha

**Figura 18**  
Orificio en la plancha

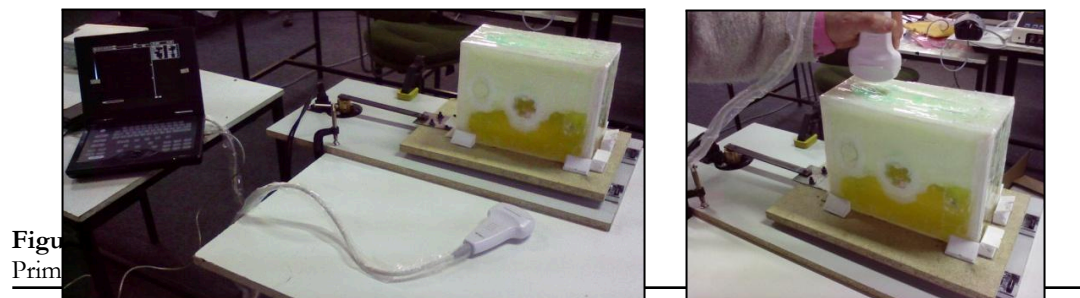
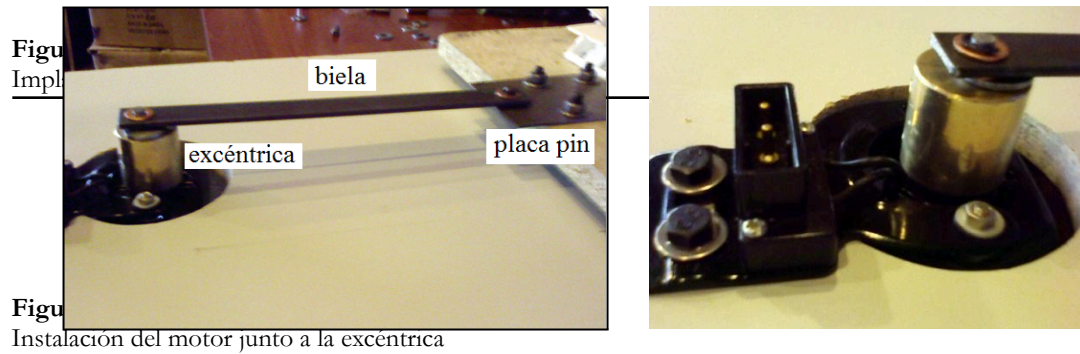
Una vez hechas las perforaciones se dispuso a colocar las piezas, en la Fig. 19 se aprecian bien dichas piezas; la placa pin, biela y el motor con la excéntrica junto al eje excéntrico y en la Fig. 20 se muestra la instalación del motor junto a la excéntrica. Ya terminado este proceso se dispuso a probar el diseño conectando el motor a la red eléctrica, por lo que resultó ser un éxito la vibración pero en esa ocasión se hizo la prueba sin el prototipo con el fin de evidenciar la factibilidad de la vibración. Finalizada la experiencia en conjunto con el Profesor Germán Blanchard se llegó a la conclusión que se debía tener un limitador de voltaje de entrada del motor para así controlar la velocidad de vibración, es por esto que se adquirió un dimmer. Dentro de la variedad de dimmer en el mercado se optó por el de 300W, ya que las especificaciones del motor eran de 220V y 100W. Cabe destacar que el dimmer comprado es de carácter resistivo (resistencias y TRIAC) mientras que el motor es inductivo, así que podrían existir algunas complicaciones con el uso prolongado del dimmer, es decir, que se queme en el proceso. Una vez ya instalado el dimmer al sistema se probó el diseño ajustando de vez en cuando el eje de excentricidad para lograr la vibración adecuada para las futuras pruebas del prototipo. Es por esto que se llegó a la conclusión de que el eje de excentricidad debía estar lo más cercano al centro

para así tener una mínima amplitud de movimiento en la base del prototipo. Con una amplitud de movimiento pequeña al momento de análisis con el ultrasonido no perjudicaría la adquisición de la imagen.

Con respecto al prototipo una vez más sufrió una fuga del líquido de su parte superior, por lo que paso a la etapa de restauración. En donde en esta ocasión se compró un producto sellador más potente llamado Vinilit que es utilizado para pegar los tubos PVC. Por lo que después se rellenó y quedó óptimo para usarse para las pruebas.

La primera prueba de elastografía que se realizó fue en el Laboratorio de Ingeniería Biomédica junto al Profesor Guillermo Avendaño. En esta experiencia se utilizó un ultrasonido portátil que fue facilitado por el propio Profesor guía, en la Fig. 21 se muestra como se obtuvieron las primeras imágenes elastográficas.

Con respecto a realizar pruebas del prototipo con la ayuda de un profesional se habló con el Jefe de la Unidad de Imagenología, Luis Muñoz del Hospital Carlos Van Buren. En donde se acordó realizar una carta dirigida al Director del establecimiento con copias para él y el Jefe de Gestión Docente e Investigación, Luis Teicheilmann, en la cual en dicha carta debía explicar en qué consistía el trabajo. Posteriormente la carta debía ser entregada en la oficina de partes de la institución, en el Anexo 3 se muestran la carta enviada al Director de la Institución de Salud.



Ya transcurrido unos días se fue a preguntar a Gestión Docente para saber si había alguna respuesta de la carta enviada, por lo que respondieron que la carta había sido recepcionada y que correspondía al memo N° 59. La persona encargada del lugar mencionó que si se quería saber más al respecto se debía ir a hablar personalmente con Sra. Mariana Torres, encargada del Comité Científico que se encontraba en el laboratorio de la institución, pues ella era la encargada de agendar las presentaciones de los trabajos recepcionados. Se conversó con la Sra. Mariana y se acordó que la presentación sería para el día 2 de Agosto en la Sala de reuniones en el sector de Oncología con una duración máxima de 10 min frente al Comité Científico.

Una vez realizada la presentación y siendo aprobada por el Comité Científico la realización del estudio, el Jefe de Unidad de Imagenología el Dr. Luis A. Muñoz Moyano indicó que había que contactarse con el Dr. Álvaro Covarrubias encargado de la Unidad de Imagenología, para programar la ejecución de las pruebas al prototipo. En el Anexo 4 se entrega la respuesta por parte de la institución para realizar el trabajo en el Hospital Carlos Van Buren.

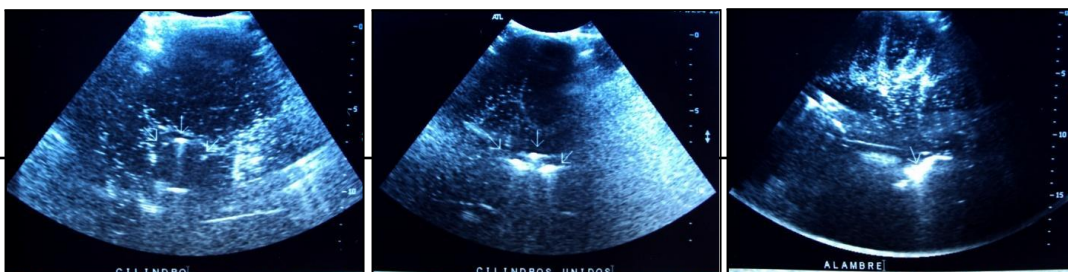
## 4. Resultados

### 4.1. Resultados obtenidos

Dentro de la implementación uno de los primeros resultados obtenidos fue las imágenes del prototipo de simulación de paciente a través de un ultrasonido. Estas imágenes obtenidas fueron gracias a la colaboración de un experto en la materia, el Radiólogo Fernando Prokes del Hospital Claudio Vicuña de San Antonio.

A continuación se muestran imágenes adquiridas del prototipo de simulación, estas imágenes se separan en Cilindro (Fig. 22), cilindros unidos (Fig. 23) y alambre (Fig. 24) que corresponden a los componentes que se encuentran al interior del prototipo de simulación. Las imágenes adquiridas fueron entregadas en una placa y las imágenes a continuación son fotografías de la placa entregada. En las imágenes obtenidas el radiólogo marca con una flecha la zona donde se encuentran los objetos analizados de manera de hacer más fácil su visualización.

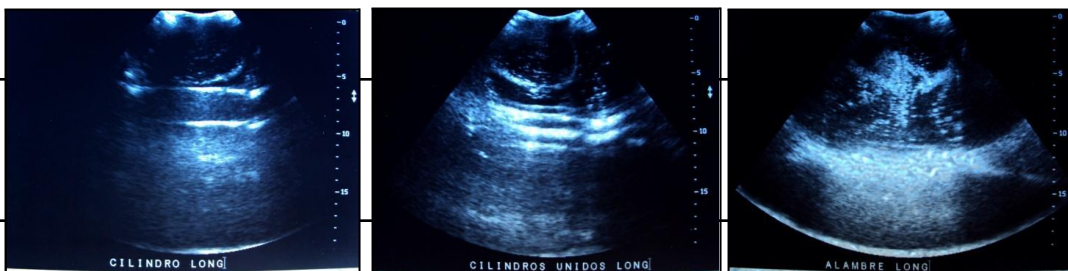
**Figura 22**  
Imagen del cilindro



**Figura 24**  
Imagen del alambre

---

Luego se muestran los mismos componentes pero vista desde otra perspectiva, una posición longitudinal (Fig. 25, 26 y 27). En la imagen del alambre longitudinal (Fig. 27) se puede observar la diferencia de fases, es decir, entre la gelatina y glicerina.



**Figura 27**  
Vista del alambre

---

Posteriormente las primeras imágenes elastográficas de ultrasonido fueron obtenidas una vez completadas las 2 condiciones mínimas, la primera era tener el prototipo de simulación de paciente listo y lo segundo era tener el sistema mecánico funcionando. Esta adquisición se realizó con la ayuda del Profesor guía y su equipo portátil de ultrasonido, a continuación se muestran las imágenes obtenidas en la primera experiencia realizada. En la Fig. 28 se aprecia a los cilindros unidos del prototipo en la versión estática y en la Fig. 29 los mismos cilindros pero con el efecto de vibración necesarias para obtener las imágenes de elastografía de ultrasonido. En estas dos imágenes se utilizó un transductor de frecuencia de 3.5MHz. Posteriormente se muestra estos mismos cilindros unidos pero desde una perspectiva longitudinal (Figuras 30 y 31).

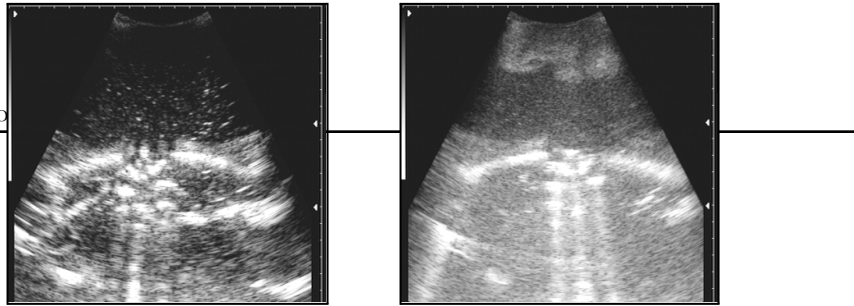
En las imágenes mostradas se puede apreciar la diferencia entre la imagen estática y la Elastográfica, por ejemplo en la Fig. 29 con respecto a la Fig. 28, se aprecia un fondo más homogéneo que en la Fig. 29. Además en la Fig. 29 se aprecian mejor los bordes de los cilindros unidos.

Luego realizada esta primera experiencia se procedió a adquirir más imágenes pero ahora con la ayuda de un experto. La razón de solicitar cooperación de un experto es que este posee un manejo en los temas de contraste de imagen y con esto se podrían

adquirir mejores imágenes de elastografía. La persona que colaboró con este trabajo fue el Dr. Álvaro Covarrubias de la Unidad de Imagenología del Hospital Carlos Van Buren. Con la asistencia del Dr. Covarrubias se obtuvieron las siguientes imágenes que se muestran en la Figuras; 32, 33, 34 y 35.

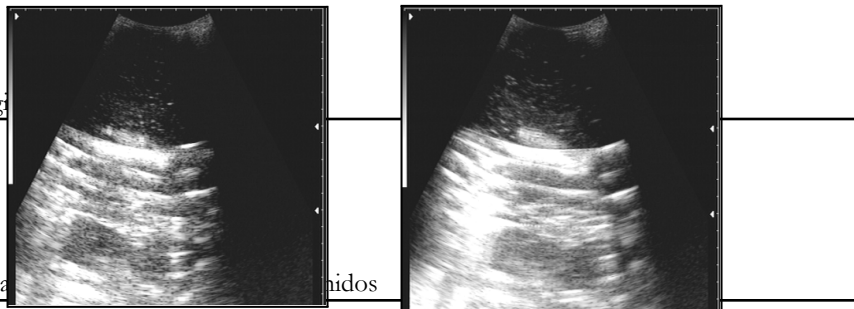
Como se aprecia en la Fig. 33 la imagen con vibración en los cilindros unidos se aprecia mejor los bordes que la imagen estática de los mismos cilindros unidos. Así mismo ocurre en la fig. 34 en donde la con vibración se aprecia mucho mas el alambre que el estático. Cabe destacar que las Figuras 32, 33 y 34 fueron tomadas por un transductor de 2-5MHz.

**Figura 28**  
Imagen estática de los cilindros unidos



**Figura 29**  
Imagen Elastográfica de los cilindros unidos

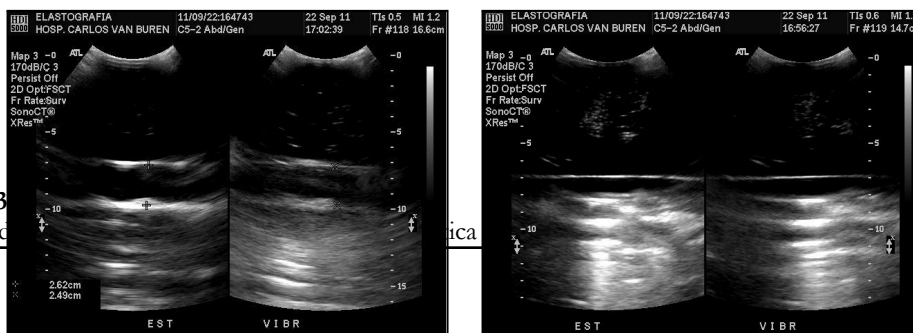
**Figura 30**  
Imagen estática longitudinal de los cilindros unidos



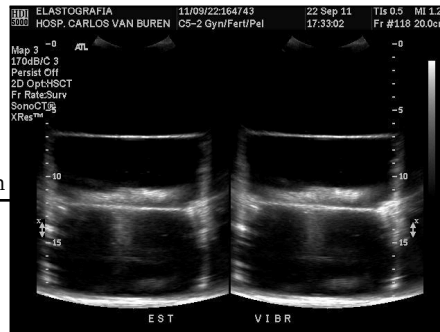
**Figura 31**  
Imagen Elastográfica longitudinal de los cilindros unidos

**Figura 32**  
Imagen del cilindro único a la izq. imagen estática y la der. con vibración

**Figura 33**  
Imagen de los cilindros unidos a la izq. imagen estática y la der. con vibración



**Figura 34**  
Imagen del alambre a la izq. imagen



La Fig. 35 está tomada con un transductor de 4 – 7 MHz, solo se aprecia la parte superior del cilindro único ya que al utilizar una mayor frecuencia tiene menor alcance. En esta imagen (Fig. 35) se aprecia más en la parte de vibración el contorno del cilindro único, en cambio en la estática llega hasta un cierto punto y se desvanece el borde.

El Dr. Álvaro Covarrubias con respecto a la Fig. 33 comento que en la imagen con vibración tiene mejor definición de los márgenes. En general el especialista manifestó que las imágenes con elastografía se definen en una mayor longitud algunas estructuras y que si encuentra una mejora en los bordes.

**Figura 35**  
Imagen del cilindro a la izq.  
vibración, con 4 -7MHz

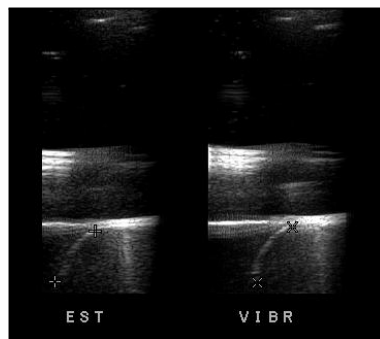


imagen estática y la der. con

#### 4.2. Estudios de validación de la propuesta y/o resultados

Al evidenciar los resultados obtenidos y ver muy levemente la diferencia entre una imagen tradicional frente a la elastográfica. Se decidió hacer procesamiento de imagen, es por esto que a continuación se muestran algunos ejemplos de procesamiento de imagen. Las Fig. 28 y 29 fueron procesadas por un filtro creado en Matlab, en donde el resultado se muestra en la Fig.36. Estas dos imágenes fueron filtradas con el mismo parámetro  $a < 210$  (ver código, Anexo 5). Aquí se puede apreciar la diferencia de la imagen estática izquierda de la elastografica derecha, se aprecia mejor los cilindros unidos en la imagen derecha.

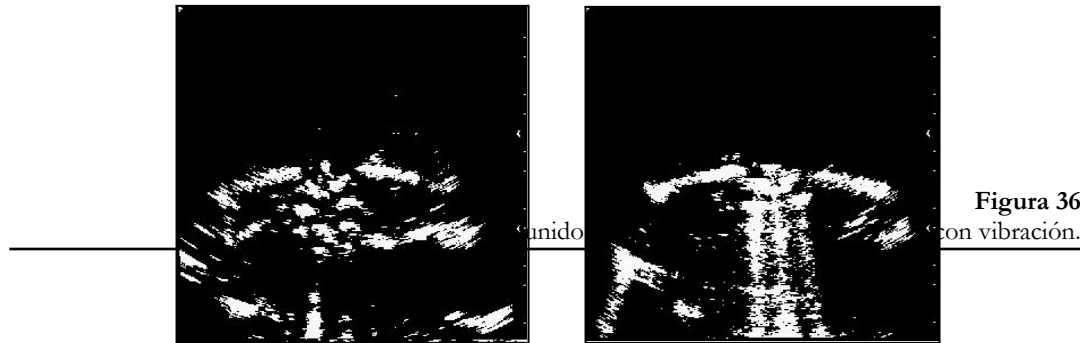
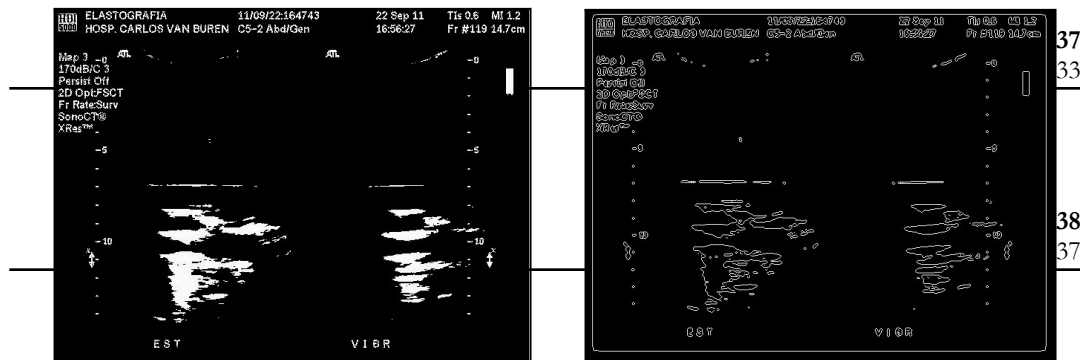
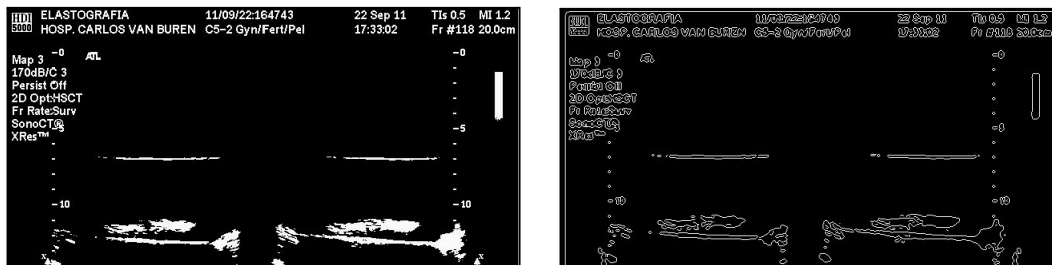


Figura 36  
con vibración.

La Fig. 33 también fue filtrada con el parámetro  $a < 180$ , aquí se aprecia en la Fig. 37 que los bordes de la vibración están mucho más definidos que en el estático. La Fig. 38 muestra un filtro de borde aplicado a la Fig. 37, con el motivo de mostrar más la diferencia entre estático y el elastográfico.



Y por último a la Fig. 34 también se aplicó el filtro con el parámetro  $a < 140$ . Esta imagen corresponde al alambre y como se puede apreciar la imagen estática no se define los extremos del alambre en cambio en la elastográfica si (Fig. 39). En la Fig. 40 muestra el filtro de borde aplicado a la Fig. 39 con el fin de simplificar más la imagen y así evidenciar la mejora de la imagen elastográfica frente a la estática.



**Figura 39**

Imagen del filtro aplicada a la Fig. 34

---

**Figura 40**

Imagen del filtro de borde aplicada a la Fig. 39

---

## 5. Discusión

### 5.1. *Discusión de los resultados*

En la primera parte de la aplicación de este trabajo ocurrieron algunos inconvenientes con respecto a la construcción de la fase mecánica, la razón de esta situación se debió a la falta de elementos de mayor potencia. Una de las grandes limitantes de un trabajo de aplicación son los componentes que se emplean, muchas veces el proyecto puede fallar a causa de ello y por ende no cumplir con los objetivos planteados. Es por esto que ante esta negativa que se produjo en un comienzo de este trabajo, se solicitó la colaboración de un especialista en la materia. Es así que se contó con la ayuda del Profesor Germán Blanchard para realizar la parte mecánica, con su experticia se logró construir la plataforma vibratoria que generaba las condiciones necesarias para hacer vibrar el prototipo.

Una vez concretada la etapa mecánica correspondía continuar con la adquisición de imágenes elastográficas de ultrasonido. Los primeros resultados de imágenes elastográficas fueron obtenidas gracias a la ayuda del Profesor Guillermo Avendaño, para esta etapa se utilizó un ultrasonido portátil por lo que sus funciones en calidad de imagen eran más acotadas que el resto de los equipos convencionales. Pero a pesar de la baja calidad de escala de grises y su baja resolución de imagen se pudo obtener imágenes elastográficas que evidenciaban la diferencia con una imagen tradicional.

En una segunda instancia de adquisición de imagen se obtuvieron una variedad de resultados, pues se contaba con un equipo de ultrasonido más potente en calidad de procesamiento de imagen. Este equipo poseía 2 transductores por lo que se pudo obtener una variedad de perspectivas del objeto en estudio. Además en esta segunda adquisición se contaba con la colaboración de un radiólogo que dominaba las técnicas de imagen de ultrasonido. El experto al momento de analizar las imágenes a través de

su visión como especialista pudo notar la diferencia entre una imagen tradicional frente a una elastográfica y comentar la mejora de esta última frente a la otra.

Posteriormente estas imágenes obtenidas fueron procesadas por un programa, que a través de filtros lograron ser simplificadas con el fin de poder evidenciar la visión del especialista, es decir, notar la diferencia de la mejora de la imagen elastográfica frente a la convencional. A partir de los resultados obtenidos de este trabajo nace una pregunta que es: ¿La visión de un experto puede ser igualada y/ó reemplazada por un programa de computadora?. Quizás en un futuro no muy lejano se podrían analizar las imágenes a través de un sistema o programa que diagnosticará automáticamente las lesiones o enfermedades sin tener la intervención del hombre.

## 6. Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Al momento de realizar la primera parte de este trabajo que consistía en la recopilación de información sobre elastografía, se pudo evidenciar el gran avance de otros países respecto a este tema. Ya desde el año 1994 en E.E.U.U se había patentado un aparato capaz de medir y proyectar imágenes elastográficas de ultrasonido. Y hace pocos años salió al mercado un equipo de elastografía de zona específica del cuerpo, también conocido como FibroScan®. Este equipo mide la rigidez hepática transformándose en un complemento para la biopsia. Por el contrario al resto del mundo, en nuestro país la elastografía es un tema no muy mencionado por no decir desconocido.

Esta una nueva técnica de proyección de imagen llamada elastografía que ha dado buenos resultados, incluso se han realizado pruebas clínicas a diferentes pacientes y se demostró que esta técnica mejoraba el rendimiento en el diagnóstico de diferentes patologías e inclusive sustituyendo a la biopsia. Una de sus ventajas es que es de carácter no invasivo, por lo cual no causa molestia al paciente al momento de realizar un seguimiento de progresión de alguna enfermedad.

Con respecto a la parte práctica de este trabajo cabe señalar que ocurrieron varias situaciones inesperadas, por lo cual se buscaron nuevas alternativas para poder cumplir con los objetivos planteados. Frente a estas situaciones imprevistas se fueron ideando soluciones a los problemas que se presentaban, para luego ser puestas a prueba y ver si estas cumplían con las expectativas del trabajo. A pesar de las dificultades encontradas en la parte de aplicación se aprendió y cumplió finalmente con los objetivos propuestos.

Los resultados obtenidos en este trabajo fueron positivos, ya que el objetivo era evidenciar la mejora de las imágenes de elastografía de ultrasonido frente a las imágenes de ultrasonido convencional. Esta mejora fue corroborada por un especialista y posteriormente las imágenes fueron procesadas por un programa computacional, que a través de filtro en las imágenes hacia la diferencia más notoria entre la imagen elastográfica frente a la tradicional.

Finalmente un punto destacable de este trabajo es que ha sido sin duda una grata experiencia de constante aprendizaje, otorgando conocimiento valioso que en algún momento de la vida profesional podrían ser aplicados.

### *6.2. Resumen de las Contribuciones*

Una de las principales contribuciones que entrega este trabajo es el estudio de una nueva técnica de proyección de imagen llamada elastografía y su respectiva aplicación en el área clínica para la detección temprana de tumores o cáncer. Este trabajo se compone de dos etapas, la primera parte corresponde a una investigación bibliográfica respecto a elastografía y luego una segunda parte de aplicación elastográfica a partir de un prototipo, donde se obtuvieron imágenes a través de un equipo de ultrasonido.

Se encontraron varias dificultades asociadas a la parte práctica del trabajo, la primera de ellas tiene relación con el prototipo de simulación de paciente ya que por el peso de las sustancias internas provocaban aberturas que retrasaban el trabajo. El segundo inconveniente fue desarrollar un mecanismo de vibración apropiado que soportase el peso del prototipo. Todas estas dificultades fueron solucionadas logrando así cumplir con los objetivos del trabajo.

En relación a los resultados adquiridos por ultrasonido, en las imágenes de elastografía se obtuvieron una evidencia de mejoría respecto a las imágenes con la técnica tradicional. Esto fue corroborado por un experto y luego analizado a través de un programa computacional.

Y para finalizar se debe rescatar la utilización de filtros digitales en el procesamiento de las imágenes obtenidas, debido a que entregan una visión mucho más cuantitativa y tangible de la evidente mejora al aplicar técnicas elastográficas.

### *6.3. Alcance de las Contribuciones*

En el presente trabajo con respecto a los resultados obtenidos la evidencia de mejora en las imágenes elastográficas fue corroborada cuantitativamente a través del procesamiento de imágenes, sin embargo la visión del especialista con quien se realizó la adquisición de imágenes entrega una opinión objetiva y robusta de los resultados obtenidos.

Según las investigaciones referidas en este trabajo la elastografía ha tenido buenos resultados en pruebas que se han realizado a diferentes pacientes, convirtiéndose en una buena herramienta en el diagnóstico preventivo de masas sólidas. Es por esto que sería muy conveniente masificar e implementar la elastografía en el área de salud a nivel nacional. Para implementar dicha técnica el costo no sería muy elevado, ya que se necesitaría de un equipo de ultrasonido que la mayoría de las instituciones de salud posee y solo bastaría adquirir el mecanismo de vibración de zona específica o bien un método capaz de generar una compresión en la zona a examinar.

### *6.4. Investigaciones Futuras*

En este trabajo uno de los principales problemas encontrados fue el desarrollo de un dispositivo mecánico de vibración controlada. La frecuencia obtenida de este mecanismo está directamente relacionada con el dimmer utilizado y con el eje de excentricidad que se encontraba en el motor. Es por esto que en investigaciones futuras se debería cambiar el dispositivo que alimenta al motor, por un convertidor de mayor potencia reemplazando al dimmer.

Respecto al prototipo se podría cambiar por una cubeta plástica prefabricada donde no se tenga que pegar constantemente cada vez que se agriete por el peso de las sustancias. O crear nuevos simuladores de pacientes.

Para potenciar el futuro de este trabajo se deberían realizar pruebas a personas, en donde se ocupe una placa externa para generar la vibración de baja frecuencia en la zona a inspeccionar y al mismo tiempo utilizando un transductor de ultrasonido para adquirir las imágenes elastográficas.

### Referencias Bibliográficas

- Bamber, J. C. (1999). Ultrasound elasticity imaging: definition and technology. *European Radiology* 9 (Suppl. 3), S327±S330
- Calisto H., Mora F., Tirapegui E. 2008. Resonancia estocástica en un sistema lineal. Paper presentado por el Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.
- Castañeda B. 2010. Medical Image Research Lab Pontificia Universidad Católica del Perú. Trabajo presentado en la Pan-American Health-Care Exchanges Lima, Marzo, Perú.
- Drakonaki EE, Allen GM. 2010. Magnetic resonance imaging, ultrasound and real-time ultrasound elastography of the thigh muscles in congenital muscle dystrophy. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20205351>
- Emelianov SY, Lubinski MA, Skovoroda AR, Erkamp RQ, Leavey SF, Wiggins RC, O'Donnell M. 2000. Reconstructive ultrasound elasticity imaging for renal transplant diagnosis: kidney ex vivo results. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11297150>
- Fauci A., Braunwald E., L. Kasper D., L. Hausen S., L. Longo D., Larry Jamson J., and Loscalzo J. 2009. *Harrison Principios de Medicina Interna*, 17ª Edición. México: McGraw- Hill.
- Gheorghe L, Iacob S, Iacob R, Dumbrava M, Becheanu G, Herlea V, Gheorghe C, Lupescu I, Popescu I. 2009. Real time elastography-a-non-invasive diagnostic method of small hepatocellular

- carcinoma in cirrosis. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20076816>
- González Fernández J. 2006. Medida y Caracterización de las propiedades mecánicas tisulares y su aplicación a la medicina guiada por imágenes. Vector Plus, Fundación Universitaria de Las Palmas. Pp. 38. Obtenido el día 16 de abril de 2010.
- Janssens E, Spahr L, Rubbia-Brandt L, Giostra E, Bihl F. 2010. Hepatic amyloidosis increases liver stiffness measured by transient elastography. Extraído el 17 de Mayo del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20458851>
- Layton Julia. Will elastography replace biopsies for confirming a cancer diagnosis?. December 6, 2006. Discovery Health. <<http://health.howstuffworks.com/medicine/tests-treatment/elastography.htm>>
- Li y, Snedeker JG. 2010. Elastography: modality-specific approaches, clinical applications, and research horizons. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20352427>
- Mitterberger M, Horninger W, Aigner F, Pinggera GM, Steppan I, Rehder P, Frauscher F. 2010. Ultrasound of the prostate. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20199941>
- Ophir J., Céspedes I., Ponnekanti H., all of Houston. Mar.15, 1994. Method and Apparatus for elastographic measurement and imaginig. United State Patent.
- Ophir et al., 2002. Elastography: Imaging the Elastic Properties of Soft Tissues with Ultrasound. J Med Ultrasonic. Vol. 29.
- Osta, V., Gastaldi, MJ., Trifone, L. 2008. Utilidad del índice Aspartato-aminotransferasa/plaquetas (APRI) en el diagnóstico no invasivo de fibrosis hepática en niños y adolescentes obesos con enfermedad hepática grasa no alcohólica. Extraído el 16 de abril de 2010 desde <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=65112146004>
- Richard Ehman L. 2008. Imágenes de la Enfermedad Hepática mediante ondas transversales. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.nibib.nih.gov/EnEspanol/eAvances/28Aug08>
- Tadić M, Stoos-Veić T, Vukelić-Marković M, Curić J, Banić M, Cabrić Z, Grgurević I, Kujundzić M. 2010. Endoscopic ultrasound in solid pancreatic masses-current state and review of the literature. Extraído el 17 de Mayo del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20432768>
- Wang, LH., Zhang, MM. 2010. Functional MR Study of hepatic fibrosis. Extraído el 27 de Abril del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20387252>
- Wojcinski S, Farrokh A, Weber S, Thomas A, Fischer T, Slowinski T, Schmidt W, Degenhardt F. 2010. Multicenter study of ultrasound Real-Time tissue elastography in 779 cases for the assessment of breast lesions: Improved diagnostic performance by combining the BI-RADS(R)-US classification system with sonoelastography. Extraído el 17 de Mayo del 2010 desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20408116>

## Glosario

**Amiloidosis:** término genérico utilizado para hacer referencia a un grupo de enfermedades de etiologías diversas con pronóstico y tratamiento variable causadas por el depósito extracelular amiloide.

**Anisótropos:** es la propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas.

**Carcinoma hepatocelular (HCC):** Un tumor en el que el cáncer comienza en la edad adulta en las células en el hígado. También se llama cáncer primario de hígado adulto.

**Cirrosis:** es una histopatología en que las células del parénquima de un órgano interno cualquiera son sustituidas por un tejido anormal de tipo cicatricial.

**Distrofia muscular:** enfermedad hereditaria que producen debilidad de los músculos estriados los cuales son los que producen los movimientos voluntarios del cuerpo humano.

**Elastograma:** es la representación gráfica de la propagación de la onda en función del tiempo y la profundidad.

**Elastografía:** nuevo método de diagnóstico de proyección de imagen por ultrasonido o resonancia magnética utilizada para determinar tejidos blandos anormales a través de parámetros de elasticidad durante la compresión de aquellos.

**Fibrosis:** es la formación o desarrollo en exceso de tejido conectivo fibroso en un órgano o tejido.

**Función de correlación Cruzada:** operación matemática que se efectúa sobre una pareja de señales, que proporciona una medida de la similitud de la forma de ambas o el grado en que las señales son más o menos idénticas, en función del desplazamiento temporal entre ambas.

**Isotropía:** Característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección.

**Modulo de Young:** Parámetro elástico que mide la relación entre tensión aplicada a un cuerpo y la deformación experimentada por unidad de longitud.

**Relación de Poisson:** Parámetro elástico, sin dimensiones, que mide cuánto se deforma lateralmente un material al ser deformado axialmente (es decir, cómo se “engrosan” lateralmente al ser comprimidos).

**Resonancia Estocástica:** fenómeno en el cual la respuesta de un Sistema Dinámico a una Perturbación Externa es optimizada por la presencia de un cierto nivel de Ruido.

**Retrodispersión:** Dispersión de partículas por la materia según ángulos mayores de  $90^\circ$  con respecto a la dirección inicial.

**Sonoelastografía:** técnica de ultrasonido para obtener imágenes de las propiedades relativas elásticas de los tejidos blandos y en particular para los tumores. En que las vibraciones son de frecuencia bajas que se propagan a través del tejido.

**Sonograma:** imagen obtenida en un escáner de ultrasonido tradicional, que representa la magnitud de los ecos de ultrasonido recibidos en cada uno de los elementos del sensor.

Trabajo de  
Título 2.  
2011-1

44

**Anexos**