

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño de dispositivo mecánico para terapia auditiva

Trabajo de graduación presentado por

Zarah Aimée Arroyo Marroquín

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2016

“Diseño de dispositivo mecánico para terapia auditiva”.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño de dispositivo mecánico para terapia auditiva

Trabajo de graduación presentado por

Zarah Aimée Arroyo Marroquín

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica


Guatemala

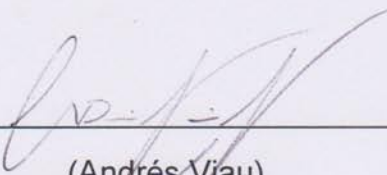
2016

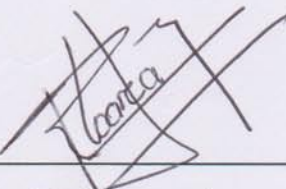
Vo.Bo.:

(f) Manuel F. Ruano
(Manuel Ruano)

Tribunal Examinador:

(f) 
(Víctor Hugo Ayerdi)

(f) 
(Andrés Viau)

(f) 
(Raúl Loarca)

Fecha de aprobación: Guatemala 7 de diciembre, 2016

PREFACIO

La elaboración del siguiente trabajo de graduación surgió del interés en los niños sordos y los pocos recursos que se invierten en la educación para ellos. Además de querer realizar un trabajo que eventualmente pudiese ayudar al área de escasos recursos. Por otro lado, el conocer esta discapacidad de manera particular hace conciencia en la poca importancia que se le da al tema; que hay poca inclusión social, educativa y laboral a las personas con discapacidades.

Tuve la oportunidad de asistir a clases con niños sordos en el Centro de Educación Continuada para Sordos Adultos (CECSA) del Benemérito Comité Pro-ciegos y Sordos y conocí las deficiencias que existen en la educación, no porque los maestros no estén preparados sino por la falta de material y herramientas debido a la falta de presupuesto. En nuestro país existe un gran atraso en la atención médica y terapéutica ya que se limita a las personas que tiene los recursos monetarios o que tiene el conocimiento de entidades que brindan ayuda gratis o con bajo costo, como las no gubernamentales. Una de estas entidades es ASEDES, manejada por personas sordas que buscan atender a la comunidad sorda para que su integración a la sociedad sea más fácil.

Al comenzar la investigación para este trabajo me encontré con poca información del tema en nuestro país. Esto fue una motivación extra para crear material que un futuro pueda mejorar la calidad de vida de las personas con sordera. Es importante poner atención a las discapacidades y los retos que estas personas tiene que superar diariamente para crear herramientas que ayuden a su integración a la sociedad y así convertirnos en una sociedad más incluyente.

ÍNDICE

PREFACIO	v
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	5
A. SORDERA	5
B. PRODUCCIÓN DE VOZ.....	6
C. PRODUCCIÓN DE VOCALES	6
D. ANATOMÍA.....	8
E. FISIOLOGÍA	10
F. ESTRUCTURA.....	13
V. METODOLOGÍA	19
A. ECUACIONES	19
B. CONSTRUCCIÓN	21
C. CÁLCULOS	24
D. RESULTADOS.....	29
E. DISCUSIÓN.....	38
VI. CONCLUSIONES.....	41
VII. RECOMENDACIONES.....	42
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	43
IX. ANEXOS	47
X. GLOSARIO.....	76

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de las vocales según la posición de la lengua.....	7
Cuadro 2.Frecuencias femeninas y masculinas de los primeros dos formantes.	8
Cuadro 3.Matriz de comparación.....	18
Cuadro 4.Resumen de parámetros	22
Cuadro 5.Comparación de propiedades mecánicas.....	23
Cuadro 6. Costos.....	24
Cuadro 7. Tabla de peso y largo por cuerda.....	27
Cuadro 8.Cálculo de densidad lineal.....	27
Cuadro 9.Resultado de velocidad de propagación de onda.....	28
Cuadro 10.Tensión requerida para las cuerdas en hombres	28
Cuadro 11. Esfuerzos requeridos para las cuerdas en hombres	29
Cuadro 12. Valores obtenidos en ANSYS.....	30
Cuadro 13. Cálculo de diámetros.	32
Cuadro 14. Primer formante pruebas.....	34
Cuadro 15. Formantes.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de discapacitados para el 2005.....	3
Figura 2. Conocimiento de la población con discapacidad de la existencia de centros especializados.	4
Figura 3. Ubicación de las Instituciones en Educación Especial.....	4
Figura 4. Primer y segundo formante.....	7
Figura 5. Estructura anatómica de la laringe.	8
Figura 6. Estructura de las cuerdas vocales.....	9
Figura 7. Desplazamiento de la onda mucosa.	11
Figura 8. Receptores en las palmas de las manos.....	12
Figura 9. Receptores táctiles en la piel.....	13
Figura 10. Modelo de Flanagan y Landgraf.	14
Figura 11. Modelo Ishizaka y Flanagan.....	14
Figura 12. Modelo Brad Story e Ingo Titze.....	15
Figura 13. Estructura cuerpo – recubrimiento (vista frontal)	15
Figura 14. Gráficas estrés-deformación de las cuerdas vocales.....	16
Figura 15. Tabla con tamaño de mano según edad.....	22
Figura 16. Pesaje de cuerda 1.	25
Figura 17. Pesaje de cuerda 2.....	25
Figura 18. Pesaje de cuerda 3.....	26
Figura 19. Pesaje de cuerda 4.....	26
Figura 20. Pesaje de cuerda 5.....	27
Figura 21. Curva Estrés- Deformación Nylon.....	30
Figura 22. Curva Estrés- Deformación Silicón.....	31
Figura 23. Curva Estrés- Deformación Teflón.....	31
Figura 24. “Tuner – gStrings”.....	32
Figura 25. Análisis espectral prueba formante 1 - A.....	33
Figura 26. Análisis espectral prueba formante 1 – E.....	33
Figura 27. Análisis espectral prueba formante 1 - I.....	34
Figura 28. Análisis espectral – A.....	35
Figura 29. Análisis espectral – E.....	35
Figura 30. Análisis espectral – I.....	36
Figura 31. Análisis espectral – O.....	36
Figura 32. Análisis espectral – U.....	37

RESUMEN

En este trabajo se investigó cómo se da la producción de voz, que partes del cuerpo participan y que función tiene cada una de ellas. Se identificaron las frecuencias con las que vibran las cuerdas vocales al pronunciar las vocales y los modelos probados para simular el habla humana. Esto con el fin de crear un prototipo para un dispositivo que ayude a los niños sordos en la terapia del habla, tanto en la escuela como en logoterapia.

Se realizó un prototipo a partir de la teoría de Ferrain para que fuese de bajo costos y simulara los primeros dos formantes de las vocales ya que estos son los que más información del habla contienen. El prototipo tiene forma de guitarra con 10 cuerdas donde cada cuerda debe vibrar a una frecuencia diferente. Se realizaron pruebas con el software Praat para identificar si se replicaban o no las frecuencias. Se determinó que este tipo de prototipo debe probarse en una segunda fase con cuerdas de otro material y mejorar aspectos de la construcción para mejorar su funcionamiento.

I. INTRODUCCIÓN

La niñez guatemalteca, en general, afronta dificultades educativas, sobre todo la que necesita de educación especial, ya que se cuentan con recursos limitados para la misma, además de los factores sociales y culturales. Según el Instituto Nacional de Estadística en el 2005, datos más actuales, 34,688 niñas/os con edades entre 10 y 19 años cuentan con capacidades diferentes. El 38 % de estos niños y niñas presentan una discapacidad auditiva. En el mundo en marzo del 2015, de los 360 millones de personas con sordera, 32 millones son niños de los cuales el 80% vive en países en desarrollo.

Como parte de esta problemática se puede definir la falta de tecnología como herramienta de apoyo para el aprendizaje. Es por esto que se evaluará un prototipo para un dispositivo capaz de simular las vibraciones de las cuerdas vocales al producir las vocales. Esto con el fin de crear una herramienta que sirva de ayuda para la educación de niños sordos y ayude a los terapeutas que brindan terapia a estos niños.

A continuación, se describirá cómo se da el proceso del habla y los factores más importantes que este involucra, qué aspectos hay que tomar en cuenta y como aplicarlos para poder realizar el prototipo requerido. Además, se describen los cálculos, la construcción, pruebas y resultados obtenido a partir del prototipo. Se determinan las mejorar y siguientes fases para que se pueda completar el proceso del diseño del dispositivo.

II. OBJETIVOS

A. Generales

1. Diseñar un prototipo de dispositivo capaz de simular las vibraciones vocales como herramienta de apoyo en la enseñanza a niños sordos.

B. Específicos

1. Establecer el valor de las tensiones que se le deben de aplicar a las cuerdas para simular las vibraciones de las vocales.
2. Determinar las variaciones de frecuencia entre las vibraciones obtenidas y las deseadas para saber si se reproducen las vocales.
3. Evaluar distintos materiales en las cuerdas para identificar con cual se obtiene la menor variación de frecuencias.
4. Obtener retroalimentación de los usuarios respecto del funcionamiento del prototipo.

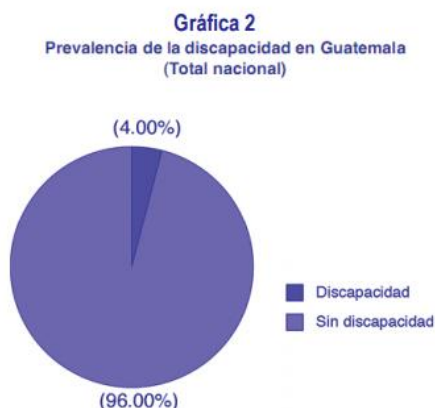
III. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala existen pocas entidades que se dediquen a la educación de niños diagnosticados con sordera. En los pocos centros que hay, la falta de tecnología para facilitar el aprendizaje de los niños es evidente, sobre todo si se busca que aprendan a hablar. Es por esto que se pretende encontrar una posible solución al diseñar un dispositivo que simule las vibraciones vocales para que el niño tenga una referencia de cómo deben sonar al practicar.

Actualmente son pocos los recursos y las herramientas con que se cuentan para ayudar a niños con deficiencias auditivas, esto aunado a la falta de recursos económicos de muchas familias. Por esto es importante que se desarrolle esta área del aprendizaje en el país para ofrecer una educación integral a todos los niños con capacidades diferentes, ya que el aprendizaje debe ir de la mano de la tecnología para hacerlo más completo y especializado dependiendo de las necesidades del estudiante.

Es importante desarrollar este dispositivo a un costo que pueda ser accesible a familias de escasos recursos pues se ha observado que muchos de estos niños no reciben la ayuda adecuada por falta de recursos. Según encuestas realizadas por el INE en el 2005, en Guatemala el 51.8% de la población con alguna discapacidad se encuentra en las áreas rurales del país. Si para el 2005, 13,181 niños/as tenían discapacidad auditiva, quiere decir que el 3.28% de la población con discapacidad tiene una discapacidad auditiva. Si se asume que el 51.8% de estos niños vive en el área rural, entonces son 6,828 niños que viven en el área rural donde se encuentra el 18% de instituciones que prestan atención en educación especial; sólo el 6% de la población sabe que existen centros especializados para la atención de discapacidades. Utilizando la tasa de crecimiento calculada por el INE en el 2015, serían 160 niños más que con discapacidad auditiva en el área rural.

Figura 1. Porcentaje de discapacitados para el 2005



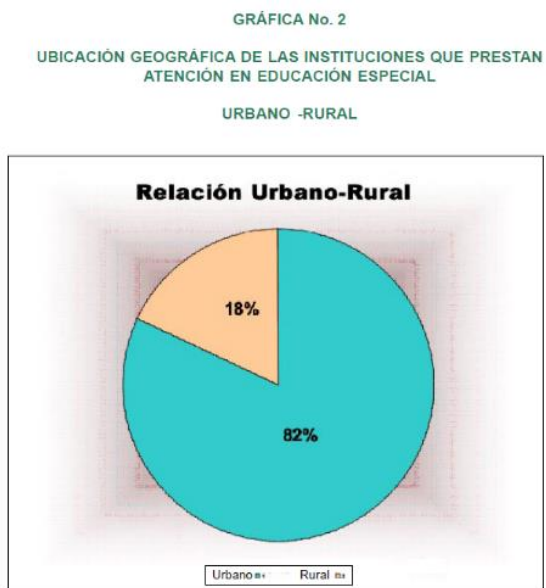
FUENTE: Instituto Nacional de Estadística. Encuesta Nacional de Discapacidad 2005.

Figura 2. Conocimiento de la población con discapacidad de la existencia de centros especializados.



FUENTE: Instituto Nacional de Estadística. Encuesta Nacional de Discapacidad 2005.

Figura 3. Ubicación de las Instituciones en Educación Especial



Fuente: (Burbano, 2005)

IV. MARCO TEÓRICO

A. SORDERA

Según Mohammad Salmani (2008:16), existen diferentes niveles de pérdida de audición; se puede ser sordo o hipoacúsico. La sordera es la pérdida total de la audición y la hipoacusia es la pérdida parcial de la audición. Estas pérdidas se dan por varias razones tanto anatómica como fisiológica y pueden darse desde el nacimiento o cuando se es mayor. Estas pérdidas pueden ser clasificadas por el momento en que se obtuvo la pérdida, por el tipo de lesión que la causó y por el grado de pérdida de audición.

Según FIAPAS, las pérdidas leves el umbral de audición va entre 20 y 40 dB, si es media es entre 41 y 70 dB, severas entre 71 y 90 dB y las profundas entre 91-100 dB. Según WHO, una persona tiene pérdida de audición incapacitante cuando la pérdida de audición es superior a los 30 dB en niños y 40 dB en adultos. Esto quiere decir que los sonidos, silenciosos, que se dan entre 25 y 40 dB son difíciles o imposibles de escuchar.

Si la pérdida de audición se da antes de aprender a hablar se le llama sordera prelocutiva, y si es después se le llama postlocutiva. En este caso nos enfocamos a la sordera prelocutiva ya que el objetivo del dispositivo es que los niños sordos e hipoacúsicos aprendan a hablar. (Salmani, 2008)

1. **Terapia vibrotáctil.** Para que los niños aprendan a hablar se emplean varios tipos de terapia dependiendo de las condiciones, es decir, si cuenta con audífonos o implantes, el tipo de aprendizaje del niño, la edad, entre otras. Un tipo de terapia aun utilizado en nuestro país es la vibrotáctil, la cual consiste en una plataforma vibrante donde se sienten las vibraciones de la música o de otros sonidos. Puede ser tanto un dispositivo como la garganta de una persona. Los aparatos toman el sonido y lo convierten en vibración, esto se da normalmente con el habla. Estos sirven para entrenar la presencia de sonido o para desarrollar la lectura labio facial. (Blog Nuevas Tecnologías)

Según Teresa Fernández (2001:19), a los niños se les enseña a asociar la visión con las vibraciones y el tacto. El niño puede percibir las vibraciones en todo su cuerpo y desarrolla un sentido rítmico que le ayuda para mejorar la coordinación, locución y desenvoltura social.

Según Mariana Maggio (2004:65), es importante que la detección de la pérdida de audición sea temprana para que sea más fácil enseñarle a un niño a hablar, ya que se aprovechan las etapas de desarrollo neurológico y lingüístico. «...la identificación de la deficiencia auditiva, el uso apropiado de la tecnología médica y la amplificación adecuada junto con la estimulación de la audición deben

ocurrir lo más temprano posible [...] ya que presentan rendimientos significativamente mejores en el desarrollo del lenguaje que los identificados posteriormente.»

B. PRODUCCIÓN DE VOZ

Para producir un sonido al hablar se necesitan de tres factores importantes: la respiración, resonancia y la emisión del sonido o fonación. La respiración es la encargada de producir la potencia necesaria para producir un sonido, esto significa que el aire hace que las cuerdas vocales vibren. (State Government Victoria) La región encargada de este proceso son los pulmones y comprenden las estructuras encargadas de la respiración: pulmones y caja torácica. Existen tres tipos de respiración de las cuales una es la más adecuada para la fonación, la respiración costodiafragmática. Esta se produce en la parte inferior del tórax y en la superior del abdomen. Es la mejor para la fonación ya que permite el control voluntario de la respiración. (Dosal,2014)

Todo el proceso antes descrito es conocido como emisión de sonido o fonación. Cuando el aire de los pulmones encuentra las cuerdas vocales cerradas, la presión y el caudal vencen esa resistencia y hacen que estas vibren rápidamente. Los encargados de realizar esta tarea son los órganos vibradores, conformados principalmente por la laringe. Estos movimientos repetitivos de abrir y cerrar las cuerdas vocales son diferentes en mujeres y hombre. En mujeres estas vibran entre 120 y 200 veces por segundo y en los hombres es entre 100 y 120 veces por segundo. (State Government Victoria)

La vibración que produce la fonación es muy débil y difícil de escuchar, es por esto que se debe de amplificar el sonido y a esto le llamamos resonancia. La resonancia consiste en modificar la amplitud de los armónicos de un sonido complejo. Durante este proceso es muy importante el papel que juega la garganta, la boca y la nariz pues dependiendo de la tensión y la forma de estas estructuras se va a obtener un timbre de voz específico. A estos amplificadores de la voz se les llama resonadores. Durante este proceso también son importantes los articuladores pues estos convierten el sonido en fonemas. Los articuladores son estructuras dentro de las cavidades resonadores como la lengua, los dientes y los labios. (State Government Victoria)

Si se utiliza en conjunto los órganos y estructuras antes mencionadas llegamos a la producción de sonido, la cual implica vibración. Esto nos ayudará a entender el proceso que debemos llevar a cabo con el prototipo para llegar a la producción de vibración.

C. PRODUCCIÓN DE VOCALES

Las vocales son los sonidos emitidos por la vibración de las cuerdas vocales, sin que exista obstáculo entre la laringe y las aberturas oral y nasal. Esta vibración es generada a partir del

principio del oscilador de relajación en la que el movimiento es cíclico de carga y descarga, en este caso la presión constante que ejerce el flujo de aire proveniente de los pulmones. Las vocales son tonales o sonoras, esto quiere decir que las cuerdas vocales vibran al reproducir estos sonidos. (Irigoyen, 2008).

Es importante el papel que tienen los resonadores y articuladores en la producción de las vocales ya que estas dependen de la posición de la lengua, mandíbula, labios y del paladar. Estos controlan los formantes, que son los picos de intensidad en el espectro sonoro producidos debido a la resonancia del tracto vocal. (HyperPhysics) Los primeros dos formantes están relacionados con el movimiento lingual; el primero con las posiciones altas y bajas dependiendo de la apertura vocal y el segundo con las posiciones anterior y posterior. En el siguiente cuadro se explica la posición de la lengua dependiendo de la vocal. El tipo de vocal depende de cómo se mueve la mandíbula al pronunciarla. (Montes)

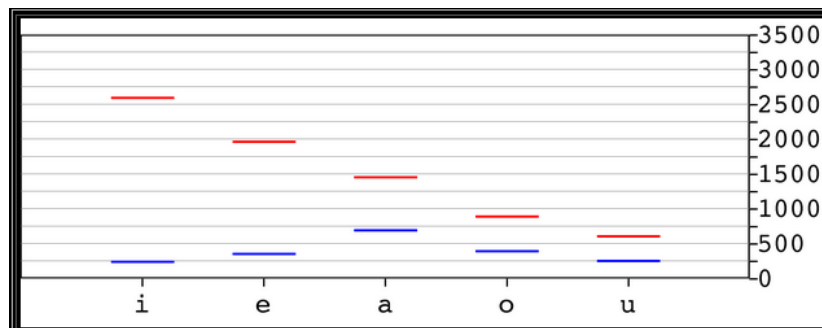
Cuadro 1. Clasificación de las vocales según la posición de la lengua.

Posición vertical	Tipo de vocal	Posición horizontal (avance)		
		Anterior	Central	Posterior
Alta	Cerrada	i		u
Media	Media	e		o
Baja	Abierta		a	

Fuente: (Irigoyen, 2008)

El primer formante (azul) tiende a ser más bajo si la posición de la lengua es alta y si la posición de la lengua es baja el formante es más alto. En el segundo formante (rojo) la frecuencia tiende a bajar a medida que la posición de la lengua retroceda (Fig. 4)

Figura 4. Primer y segundo formante.



Fuente: (Montes)

Las frecuencias de los formantes varían dependiendo de si es un hombre o una mujer la que habla. En el mundo, según el Instituto Estadounidense de Sordera, los hombres son más propensos a desarrollar sordera que las mujeres. Por lo que, en este estudio vamos a simular las frecuencias de hombres (Cuadro 2). Estas se obtuvieron del estudio realizado por Eugenio Martínez en 1995.

Cuadro 2. Frecuencias femeninas y masculinas de los primeros dos formantes.

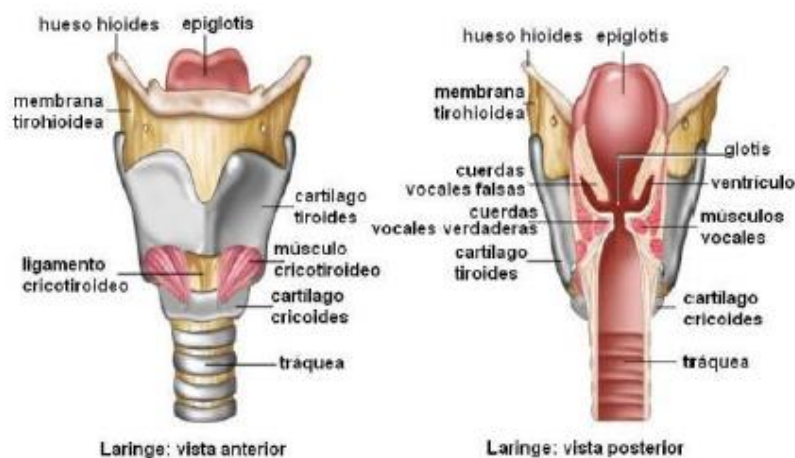
Hombres			Mujeres		
Vocal	F1 (Hz)	F2 (Hz)	Vocal	F1 (Hz)	F2 (Hz)
a	699	1471	a	886	1712
e	457	1926	e	576	2367
i	313	2200	i	369	2685
o	495	1070	o	586	1201
u	349	877	u	390	937

Fuente: (Martínez, 1995)

D. ANATOMÍA

Las partes más importantes durante la emisión de sonido son las encargadas de la vibración de las cuerdas vocales. Estas se encuentran dentro de la laringe, la cual está ubicada al inicio de la tráquea. Esta es la encargada de transformar el aire espirado en sonidos. La laringe puede ser dividida anatómicamente en cuatro partes: esqueleto, mucosa, músculos intrínsecos y músculos extrínsecos. (Dosal, 2014)

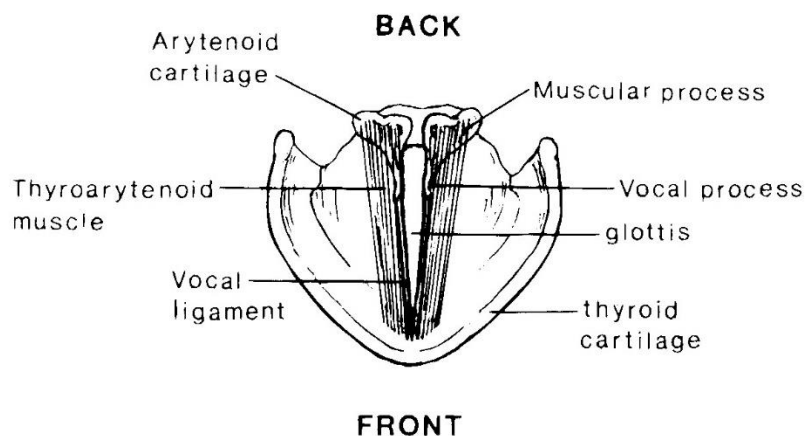
Figura 5. Estructura anatómica de la laringe.



Fuente: (Dosal, 2014)

Las cuerdas vocales son estructuras complejas que se conforman por varias capas de cartílago, ligamentos, músculos, etc. Los músculos que constituyen la masa principal de las cuerdas vocales son los tiroaritenoides (TA), de 7 a 8 mm de espesor, los cuales unen los cartílagos de la tiroides y el aritenoides. Este músculo a la vez se divide en dos: tirovocalus y tiromuscularis, los cuales se encargan de regular la tensión longitudinal de las cuerdas (Fig.6). Luego se encuentran los músculos cricotiroideos (CT) este se encarga de incrementar la tensión y frecuencia fundamental de las cuerdas vocales (Fig.4). Estas tienen un movimiento opuesto a los TA por lo que se incrementa la tensión longitudinal de las cuerdas vocales. (Shaw, 2010)

Figura 6. Estructura de las cuerdas vocales.



Fuente: (Borden, 1994)

A parte de los músculos, las cuerdas vocales están compuestas por cuatro capas de tejido. El tejido más superficial es el epitelio. Esta es una capa escamosa de células que actúan como una capsula que ayuda a mantener a los tejidos más líquidos; es entre 0.05 y 0.10 mm de espesor. Luego se encuentran tres capas de lámina propia. La primera capa es de aproximadamente 0.5 mm de espesor y está compuesta por fibras de elastina con colágeno y un tipo de proteína espacial que le da la característica de estiramiento y elongación. Las siguientes dos capas son compuestas también de proteína y colágeno sin embargo son más rígidas lo que limita la elongación de las cuerdas. Las tres capas de lámina propia tienen un espesor de 1.5 a 2.5 mm. (Shaw, 2010)

El colágeno es el principal componente de la lámina propia, siendo el 43%; se encuentran orientadas de manera que puedan soportar la fuerza aplicada por los músculos intrínsecos de la laringe. Este compone la mayor parte de la capa media e inferior y existe muy poco en la capa superior como se observa en la tabla. La elastina compone el 8.5% de la lámina propia y les permite a las cuerdas vocales mantener su forma. Las cuerdas vocales contienen ácido

hialurónico, el cual le aporta la mayor parte de viscosidad ya que retiene gran cantidad de agua; esta viscosidad sirve como amortiguamiento. (Black,1998)

E. FISIOLÓGÍA

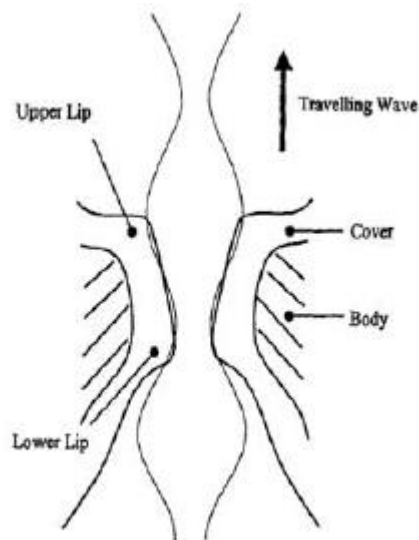
La fisiología estudia los mecanismos con los que se produce la vibración. Los fuelles facilitan la presión subglótica, presión de aire bajo la glotis, necesaria para mantener la onda vibratoria de los pliegues vocales. Esta vibración es producida durante la espiración o “soplo fonatorio”, la cual es mucho más larga que la inspiración. Durante la fonación el volumen de los pulmones varía en relación con la respiración normal, puede ir de 2 a 12 cm de H₂O. (Dosal, 2014)

Los órganos vibradores son los encargados de convertir el aire espirado en energía acústica. Las cuerdas vocales pueden realizar movimientos de abducción (apertura) y aducción (cierre), lo que genera cuatro posiciones básicas de las cuales dos son las que nos interesan. El cierre involucra la contracción del músculo TA superior, lo que implica el cierre de la glotis y el acercamiento de los cartílagos aritenoides. La apertura normal donde intervienen los músculos CT lateral y posterior para abrir la glotis y desplazar los cartílagos aritenoides hacia afuera. (Dosal, 2014)

Durante la fonación existe una fase “prefonatoria” en donde los pliegues vocales se aproximan entre sí y se estrecha el tracto respiratorio a nivel de la glotis. Al estar las cuerdas vocales en aducción, el flujo de aire produce la vibración sonora y es allí donde se transforma la energía aerodinámica en acústica. Los pliegues permiten el paso de pequeños volúmenes de aire forzado provocando la separación y choque de las cuerdas entre ellas. Este proceso se da de manera cíclica lo que origina una onda que va desde la capa interna de mucosa hasta la superficie de las cuerdas. (Dosal, 2014)

La onda comienza en el borde libre del pliegue y se propaga por la cara superior del pliegue una y otra vez dando paso al ciclo glótico. La velocidad del desplazamiento de la onda varía en función de la longitud de los pliegues, del flujo de aire espirado y de la contracción de los músculos laríngeos. La variación de la velocidad está entre 0.5-1 m/s. Cada uno de los ciclos glotales son igual en amplitud y duración. En la Figura 7 se puede observar la forma y la dirección de la onda a partir del movimiento de las cuerdas vocales. (Dosal, 2014)

Figura 7. Desplazamiento de la onda mucosa.



Fuente: (Dosal, 2014)

1. Teorías de vibración de las cuerdas vocales. Ferrein, uno de los pioneros en el estudio de las cuerdas vocales, en 1741 propone que las cuerdas vocales vibran como las cuerdas de un violín. Sin embargo, esta suposición no es válida ya que se necesita de un resonador para que el sonido sea audible. La resonancia de la laringe es pobre, es por esto que se necesitan de la energía del aire que pasa entre las cuerdas vocales para que el sonido sea audible. (Reetz & Jongman, 2009).

La teoría Mioelástica por Ewald. Propuesta a inicios del siglo XIX, esta sostiene que la vibración depende solamente de la presión subglótica y de la tensión de las cuerdas vocales. Las cuerdas se encuentran naturalmente cerradas, al aumentar la presión subglótica, su elasticidad es superada por la fuerza de la presión y esto las separa. Sin embargo, esta apertura tendría una duración muy corta y las cuerdas volverían a unirse. (Dosal, 2014)

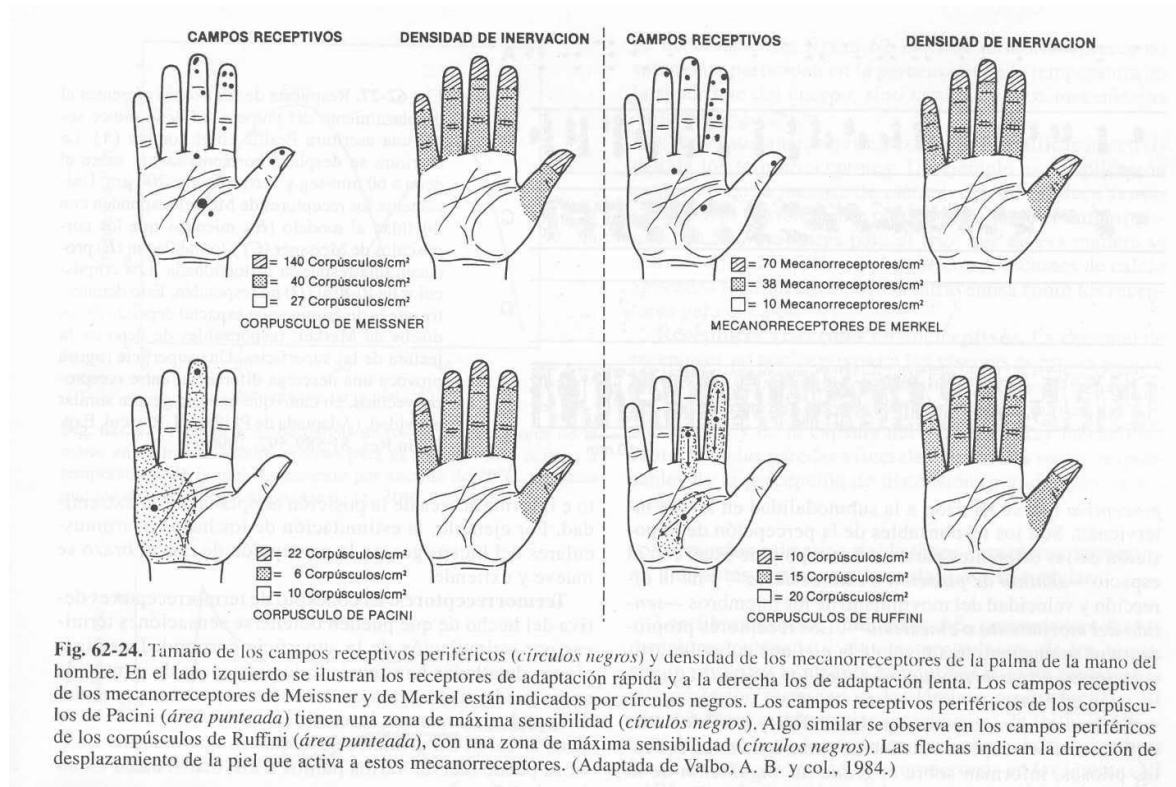
Teoría neurocronaxica de Husson, propuesta en 1950. Esta plantea la participación activa de las cuerdas vocales durante la fonación gracias a la actividad motora del nervio laríngeo, el cual determina la frecuencia de vibración. Cada impulso provoca la contracción de los músculos dejando pasar pequeños volúmenes de aire. No obstante, esta teoría ha sido rechazada. (Dosal, 2014)

La teoría aerodinámica mioelástica completada. Es complementaria a la teoría mioelástica de Ewald. Esta es complementada por varios autores basándose en aspectos clínicos y conceptos

básicos. Sabiendo que la presión subglótica es la que obliga a la separación de las cuerdas vocales, existe una fuerza que se opone a este movimiento (fuerza mioelástica) y por el efecto de succión al disminuir la presión (efecto de Bernoulli), el perfil de la laringe experimenta una disminución de calibre simulando un tubo de Venturi. Cuando las cuerdas vocales están juntas se produce un movimiento brusco de cierre y apertura lo que produce el ciclo glótico. Hoy en día esta es la teoría más utilizada. (Otorrinoweb, S/A)

2. Receptores táctiles. Un requerimiento importante es que los niños sean capaces de colocar la mano y sentir las vibraciones. Parte de la idea inicial es que los niños sintieran las vibraciones en la muñeca a través de una pulsera. Sin embargo, la cantidad de receptores es mucho menor que en las palmas.

Figura 8. Receptores en las palmas de las manos



Fuente: (Pacheco)

En la piel se tienen varios receptores que reaccionan dependiendo del estímulo. En este caso los más importantes son los corpúsculos de Pacini y los de Meissner. Los corpúsculos de Pacini responde por la presión a vibraciones de alta frecuencia. Estos están compuestos por terminaciones nerviosas rodeadas de capas de tejido conectivo. Estos se localizan en capas subcutáneas de la piel y músculos, articulaciones y órganos internos. En las manos existen

alrededor de 350 por dedo y 800 en la palma. Los corpúsculos de Meissner responden por el tacto a las vibraciones de baja frecuencia. Son mecanoreceptores de adaptación rápida localizados en las papilas dérmicas de la piel de los dedos y palmas de las manos. En estas áreas determinan la mitad de los receptores. (Serra, 2006)

Figura 9. Receptores táctiles en la piel

CUADRO 10-4		Receptores táctiles en la piel		
RECEPTOR	ESTÍMULO	LOCALIZACIÓN	ESTRUCTURA	ADAPTACIÓN
Terminaciones nerviosas libres	Distintos estímulos de tacto y presión	Alrededor de las raíces del pelo y debajo de la superficie de la piel	Terminaciones nerviosas amielínicas	Variable
Corpúsculos de Meissner	Aleteo, golpecitos	Capas superficiales de piel	Encapsuladas en tejido conectivo	Rápida
Corpúsculos de Paccini	Vibración	Capas profundas de piel	Encapsuladas en tejido conectivo	Rápida
Corpúsculos de Ruffini	Estiramiento de la piel	Capas profundas de piel	Terminaciones nerviosas agrandadas	Lenta
Receptores de Merkel	Presión constante, textura	Capas superficiales de piel	Terminaciones nerviosas agrandadas	Lenta

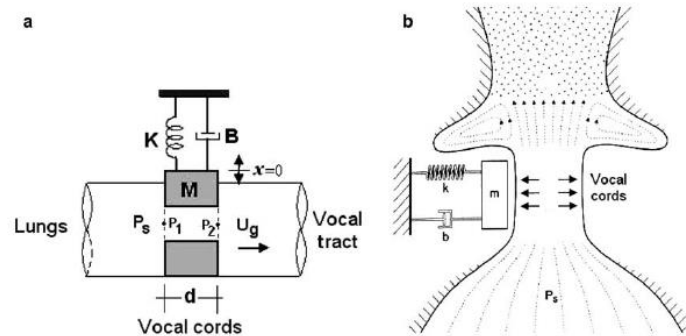
Fuente: (Silverthorn, 2009)

F. ESTRUCTURA

1. **Historia.** A lo largo del tiempo se han realizado varios modelos para simular las cuerdas vocales. En 1741 Ferrein asumió que las cuerdas vocales funcionaban como las cuerdas de un violín y que vibran por acción de la corriente de aire pulmonar y ejercen la función del arco. Sin embargo, esto no es posible ya que una cuerda oscilante necesita de un cuerpo resonante. Además, necesita de la energía del aire para hacer que la vibración de las cuerdas suene. (Reetz & Jongman, 2009).

En 1968 Flanagan y Landgraf simularon la vibración de las cuerdas vocales a partir de un simple sistema masa-resorte (Fig. 10). En este las cuerdas vocales eran la masa y el resorte y el amortiguador representaban los músculos y cartílagos. Al ser de un solo grado de libertad, no se daba la diferencia vertical de fase (apertura de las cuerdas de abajo hacia arriba y cierre de la misma manera). (Cataldo, 2005)

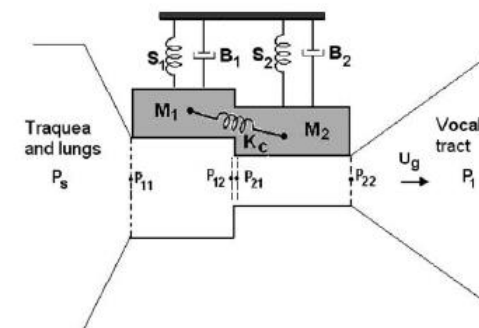
Figura 10. Modelo de Flanagan y Landgraf.



Fuente: (Cataldo, 2005)

En 1972, Ishizaka y Flanagan crearon el modelo de dos masas llamado IF72. Este era capaz de producir la diferencia vertical de fase debido a sus dos grados de libertad ya que cada cuerda vocal fue representada por dos masas (Fig.11). Los resortes acoplados a las masas son no lineales y el que une a las masas entre si es lineal. Sin embargo, no hay una correlación directa entre el efecto de contracción de los músculos y la rigidez de los resortes. Este modelo era utilizado para estudiar patologías en las cuerdas vocales. (Cataldo, 2005)

Figura 11. Modelo Ishizaka y Flanagan



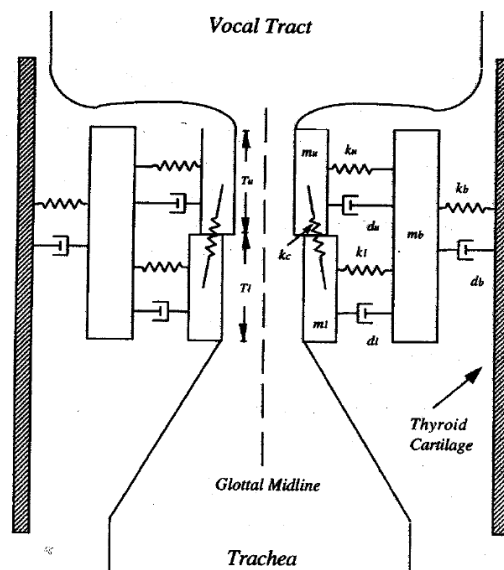
Fuente: (Cataldo, 2005)

Luego entre 1973 y 1974 Titze, para representar tanto el modo vertical como el longitudinal de vibración de las cuerdas vocales, creó un modelo con 16 masas llamado T73. Aquí las masas estaban conectadas en parejas y no a una estructura fija para permitir trayectorias en dos dimensiones, así como las cuerdas vocales se mueven realmente. Sin embargo, el nivel de dificultad para el análisis del sistema aumenta y lo hace impráctico. Al no ser tan eficiente el modelo de dos masas, por no capturar la estructura de las cuerdas vocales se buscan otras

alternativas a este modelo. No obstante, el utilizar muchas masas hace al sistema complejo a pesar de ser más preciso. (Story, 1995)

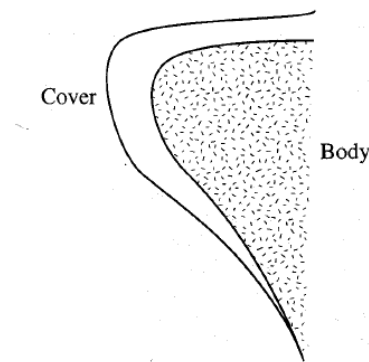
Varias investigaciones y análisis a estos diferentes modelos han demostrado que la vibración de las cuerdas vocales está dominada por los primeros dos a tres modos de vibración del sistema. Esto implica que utilizar un modelo con pocas masas puede capturar la mayor parte de las características de la vibración. Es por esto que Brad Story e Ingo Titze deciden realizar un modelo de tres masas (Fig.12), donde la tercera masa representa los componentes del cuerpo de las cuerdas vocales (Fig. 13).

Figura 12. Modelo Brad Story e Ingo Titze.



Fuente: (Story, 1995)

Figura 13. Estructura cuerpo – recubrimiento (vista frontal)



Fuente: (Story, 1995)

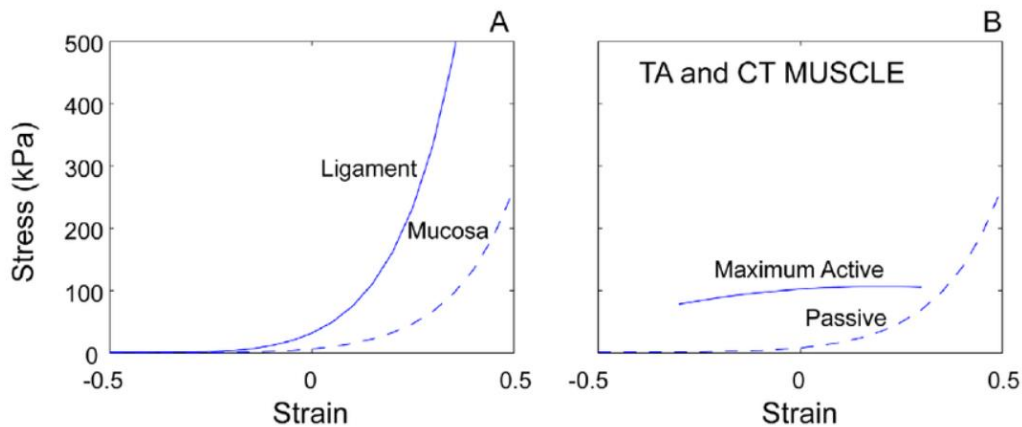
2. Propiedades mecánicas de las cuerdas vocales. Las propiedades mecánicas contribuyen a que se necesite la mínima cantidad de presión de aire para producir la voz. Esta presión es conocida como presión límite.

Como se explicó anteriormente, las cuerdas vocales están compuestas por tres capas de lámina propia. Cada una de estas capas están formadas de diferentes tipos de proteína que le da las características necesarias. Las proteínas fibrosas son las encargadas de manejar la tensión y forma de las cuerdas vocales. (Shaw, 2010)

La capa superficial de lámina propia consiste en tejido con poco colágeno y fibras de elastina, esto le da alta viscosidad y tiene una deformación mayor. La siguiente capa contiene en gran proporción fibras de elastina, que le permiten una gran deformación con más estructura que la capa anterior. La capa final tiene mayor proporción de fibras de colágeno lo que le dan poca capacidad de deformación, pero una alta resistencia a la tensión. (Shaw, 2010)

En la Figura 14, se ve que el inicio de la curva representa el comportamiento de las fibras de elastina, para la curva del ligamento en la gráfica A. Luego que aproximadamente el 30% de la deformación ha ocurrido, la curva comienza a curvarse y representa las fibras de colágeno. La gráfica B representa el comportamiento si los músculos TA y CT están activos durante la fonación. (Titze, 2010)

Figura 14. Gráficas estrés-deformación de las cuerdas vocales



Fuente: (Titze, 2010)

El epitelio, la capa más superficial de las cuerdas vocales, tiene un módulo de Young de 41.9 kPa para deformaciones menores del 15%. Debajo de este se encuentran las tres capas de lámina propia antes mencionadas. Estas tienen un módulo de rigidez transversal de 0.1 kPa y una viscosidad dinámica de 1 Pa·s a 1 Hz. Luego encontramos a los músculos TA, que se encuentran en tensión longitudinal, los cuales tienen un módulo de Young de 20.7 kPa para deformaciones menores del 15%. El ligamento que separa a los músculos de la lámina propia tiene un módulo de Young aproximadamente de 36.1 kPa. (Dembinski, 2014)

Según estudios realizados por Chan *et al* en 2007, el módulo de Young respecto a la elongación longitudinal de las cuerdas vocales con una deformación del 40% para hombres es de 1000/1750 kPa y para mujeres de 480/350 kPa. Estos valores son para la cobertura de las cuerdas y el ligamento respectivamente. (Dembinski, 2014)

Estudios realizados en laringes humanas por Chhetri *et al* en el 2009, muestran que el módulo de rigidez transversal es de 1.076 a 1.307 kPa dependiendo de a qué músculo se le da estimulación; CT o CT lateral. (Dembinski, 2014)

3. Modelo. Para determinar cuál de estos modelos. A continuación, se realizará una matriz de decisión para determinar qué modelo nos conviene más al momento de realizar los cálculos y facilite la construcción del mismo.

Cuadro 3. Matriz de comparación

Criterio	Cuerdas		IF72		T73		Modelo Titze		Puntuación	Escala
Composición	3	9	3	9	1	3	2	6	3	1 = Compleja 3 = simple
Análisis simple	4	20	5	25	1	5	3	15	5	1 = menos simple 5 = más simple
Precisión	3	12	2	8	4	16	3	12	4	1 = menos precisa 4 = más precisa
Funcionamiento	3	9	1	3	3	9	2	6	3	1 = menos 3 = más
Costo	3	12	3	12	1	4	2	8	4	1 = más costoso 4 = menos costoso
Totales		62		57		37		47	Peso máx	67

Fuente: Elaboración propia

V. METODOLOGÍA

Se realizará un modelo basado en la teoría de las cuerdas de Ferrein en 1741. Se utilizará el principio de una guitarra acústica ya que esta tiene un resonador integrado. Esta se accionará manualmente por medio del usuario; este debe ejercer una fuerza en la mitad de las cuerdas para hacerlas vibrar. Se utilizará dos cuerdas por letra, representando el primer y segundo formante, las cuales deben ser accionadas al mismo tiempo. Cada cuerda estará tensada con la tensión calculada para obtener la frecuencia requerida. Se realizarán análisis en ANSYS para determinar la deformación de las cuerdas a partir de las tensiones calculadas para conocer el comportamiento de las mismas y determinar que material es mejor para esta aplicación, es decir con que material se deforman menos las cuerdas.

Para verificar que las cuerdas vibran con las frecuencias requeridas se realizará un análisis espectral de una grabación de las cuerdas al vibrar, se tomarán los primeros dos formantes utilizando el software PRAAT y se compararán con los formantes teóricos. En este caso se utilizarán solamente las frecuencias para hombres ya que son estos los más propensos a desarrollar sordera según las estadísticas. Se realizarán pruebas con niños para determinar si se sienten las vibraciones, si el prototipo es funcional y encontrar las mejoras para una posible siguiente fase.

A. ECUACIONES

1. Vibración transversal de una cuerda. Una cuerda es un conjunto de hilos entrelazados que forman un solo cuerpo largo y flexible. Esta no puede ser separada en masa, amortiguadores o resortes, por lo que se aplica el análisis de sistemas continuos. Para esto se toma una unidad de longitud de la cuerda, de longitud l , sometida a una fuerza transversal. Si se realiza el análisis de fuerzas en z obtenemos: (Rao, 2012)

$$\sum F_z = ma \quad (1)$$

$$(T + dT)\text{sen}(\theta + d\theta) + f dx - T\text{sen}\theta = \mu dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

Figura 12. DCL del elemento analizado de la cuerda

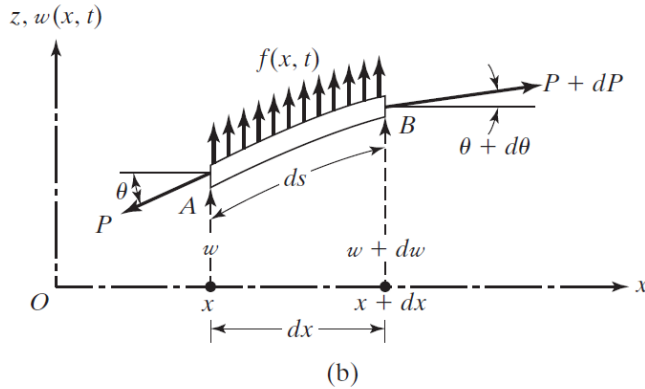


Figura 9.1 Cuerda vibratoria.

Fuente: (Rao, 2012)

para el elemento dx sabemos que:

$$dT = \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (3)$$

$$\text{sen}\theta \simeq \text{tan}\theta = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4)$$

$$\text{sen}(\theta + d\theta) \simeq \text{tan}(\theta + d\theta) = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \quad (5)$$

Sustituyendo y simplificando:

$$\left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx\right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx\right) + f dx - T \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) = \mu dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T \frac{\partial w(w,t)}{\partial x} \right] + f(x,t) = \mu(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (7)$$

Al tener una cuerda uniforme y de tensión constante y la fuerza transversal es cero entonces:

$$T \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (8)$$

De esta ecuación se obtiene la ecuación de onda o de velocidad de propagación de las ondas transversales. Utilizando esta se puede determinar la tensión necesaria en las cuerdas.

$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (9)$$

Donde

c es la velocidad de propagación

T es la tensión de la cuerda [N]

μ es la densidad lineal de la cuerda [kg/m]

P es la presión en la cuerda [Pa]

ρ es la densidad de la cuerda [kg/m³]

Sabemos que la frecuencia de una cuerda se obtiene de

$$f = \frac{c}{2l} \quad (10)$$

A partir de esta ecuación podemos obtener la velocidad necesaria para la frecuencia requerida. (Rao, 2012)

B. CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del dispositivo se utilizaron cuatro angulares de hierro dulce de 1x1x1/8; se utilizaron 2 de 12 pulgadas de largo y dos de 10 pulgadas de largo. Estas se soldaron y se creó el marco donde se colocarían las cuerdas. Para crear una elevación y evitar que las cuerdas topen con el marco, se utilizó un angular de 1x1x1/8 y una placa de 1x1/2. El angular se modificó para que quedara de 1x1/2x1/8. Luego se realizaron dos bases para las clavijas con placas de 1 pulgada. En cada placa se realizaron 5 agujeros de 3/8 para instalar las clavijas y estas se aseguraron con remaches (Anexo 2).

Las cuerdas vocales se modelaron como simples cuerdas sostenidas a una base, simulando las cuerdas de una guitarra. Como se mencionó anteriormente, se colocaron dos cuerdas que simularán un modo de vibración respectivamente. Como anteriormente se explicó, los primeros dos modos de vibración son los más importantes al momento de la fonación por tanto se utilizarán solamente esos.

1. **Parámetros.** Para este modelo se utilizará un largo de cuerdas determinado para que la estructura se adecue a cualquier tipo de persona, según los requerimientos (Anexo 1). Por lo tanto, la cuerda dentro de la estructura del dispositivo debe tener un largo de 12 pulgadas según la Figura 15.

El tamaño del dispositivo va a depender del tamaño promedio de la mano de un adulto. Si bien el dispositivo está dirigido para niños, es común encontrar adolescentes y adultos sordos aprendiendo a hablar, por lo tanto, el dispositivo también debe de adecuarse a cualquier persona.

Figura 15. Tabla con tamaño de mano según edad

Hand Size Chart

Category	Age	Hand Size*	Finger Size**
Infant: Under 5 lbs	Preemie	2.5 – 3"	1 – 2
Infant: 5 - 7 lbs	Newborn	3"	1 – 2
Infant: 7 - 9 lbs	Newborn	3 – 3.5"	1 – 3
Baby	3 – 6 months	4 – 4.5"	1 – 3
	6 months – 1 year	4.25 – 4.75"	2 – 3
Toddlers	18 months – 2 years	4.5 – 5.5"	2 – 3
	2 – 3 years	4 – 6"	4 – 5
	3 – 4 years	5 – 7"	4 – 5
Kids	5-8 years	5 – 7"	5 – 6
	12 years	Use adult sizing	Use adult sizing
	14+ years	Use adult sizing	Use adult sizing
Woman	XXS Small	5.5"	6 – 6.5
	XS Small	6"	7 – 7.5
	Small	6.5"	8 – 8.5
	Medium	7"	9 – 9.5
	Large	7.5"	10+
Man	Medium	8"	9 – 9.5
	Large	9"	10 – 10.5
	XL Large	10"	11 – 11.5
	XXL Large	11"	12 – 12.5
	XXXL Large	12"	13 – 13.5

*Hand Size: measure at the widest part of the palm (around the knuckles), use dominant hand for measurement.
 **Finger Size: circumference around the finger measured in centimeters.
 ***ALWAYS measure first, if you can!

© 2012 Crochet Rochelle

Fuente: (Crochet Rockers)

Cuadro 4. Resumen de parámetros

Parámetro	Valor
Largo de la cuerda	Aprox. 0.3 m
Ancho de la estructura	10 in
Largo de la estructura	12 in

Fuente: Elaboración propia

2. Materiales. Para las cuerdas se realizaron cálculos tanto con cuerdas de teflón como con cuerdas de nylon y silicón, esto con el objetivo de identificar qué material es el más adecuado. Se escogió nylon ya que es el material más comercial, con un módulo de Young mayor al de las cuerdas vocales, encontrado para cuerdas. Las pruebas se realizaron con las cuerdas de nylon ya que son las más fáciles de conseguir y porque son accesibles. El teflón se escogió ya que junto con el silicón líquido es una de los materiales más utilizados para inyectar en las cuerdas vocales dañadas. (Suarez, 2008)

El nylon es un tipo de termoplástico formado por una larga cadena de poliamida a partir de la policondesación; caracterizado por sus buenas propiedades mecánicas. El nylon 6 es el menos costoso, por lo tanto, el más común (Massey,). Algunas cuerdas tienen un recubrimiento de plata con el fin de obtener tonos más fuertes. Estas cuerdas se hacen enrollando a un núcleo fino, otro material para que la cuerda sea un poco más rígida. Las propiedades mecánicas del nylon serán comparadas con las propiedades de las cuerdas vocales; estas se muestran en el siguiente cuadro. (Jansson, 2002).

El teflón es un polímero resistente al calor y a agentes químicos. Tiene una baja resistencia a la compresión y un bajo coeficiente de fricción. Es relativamente flexible y tiene una memoria plástica. Se puede obtener por moldeo o extrusión, sin embargo, el moldeo es de mejor calidad. La mayor desventaja de este material es el precio elevado. Este es utilizado como material sustituto en las cuerdas vocales debido a que no puede ser reabsorbido. (Universidad de Valladolid)

Otro material que podría utilizarse es el silicón, pero no líquido sino como elastómero. Ya existe un tipo de prótesis de este material que reemplaza las cuerdas vocales. El silicón es un polímero inorgánico o semi-inorgánico con enlaces siloxanos. Estos pueden producir como líquidos, resinas o elastómeros. Los elastómeros resisten deformaciones elásticas con esfuerzos relativamente bajos; más específicamente los silicones resisten altas temperaturas, tienen propiedades mecánicas aceptables. Son de alto costo por lo que, se consideran hules de propósito especial. (Groover, 1997)

Cuadro 5. Comparación de propiedades mecánicas

Material	Módulo de Young (Kpa)	Módulo de Rigidez (Kpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de Elasticidad (Mpa)
Colágeno, elastina (Cuerdas Vocales)	1750	1.076 a 1.307	-	-
Nylon	1.5×10^6	-	0.40	40
Teflón	750,000	-	0.46	41.4
Silicón	165×10^6	-	0.5	7000

Fuente: (5, 15, 28, 31, 32, 36, 42, 50, 55)

En este caso la elasticidad del material es lo más importante ya que esta propiedad es clave para controlar la frecuencia fundamental en la vocalización. Al momento de hablar y producir frecuencias muy altas, las cuerdas vocales sufren una elongación severa, es por esto que la elasticidad del material debe ser la primera propiedad en consultar. Durante este proceso, el

ligamento de las cuerdas vocales es el que alcanza la elongación longitudinal más grande, por lo que, es el tejido sometido a mayor deformación. (Riede, 2008)

En este caso se utilizaron las cuerdas de nylon en el prototipo ya que son las más fáciles de adquirir y por su bajo costo. Sin embargo, se realizaron las simulaciones en ANSYS para conocer cómo se comportan las cuerdas de teflón y silicón en comparación con las de nylon y encontrar el material que mejor se adecue, con el fin de obtener mejores resultados.

3. Costos.

Cuadro 6. Costos

Artículo	Costo
Set de cuerdas de nylon (2)	Q. 168.00
Set de clavijas (2)	Q.118.00
Marco	Q. 40.00
Caja	Q. 80.00
Mano de obra	Q. 1000.00
Otros	Q. 500.00
Total	Q. 1,900.00

Fuente: Elaboración propia

C. CÁLCULOS

Para calcular la tensión necesaria que debe tener cada cuerda para que vibran a la frecuencia deseada, primero se calculó la densidad lineal de masa de cada cuerda. Para esto se pesó cada cuerda y se midió el segmento pesado para sacar la relación de densidad lineal de cada cuerda. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron cuerdas de nylon para realizar las mediciones pertinentes en el prototipo. A continuación, se muestran los resultados (Cuadro 7).

Figura 16. Pesaje de cuerda 1.



Figura 17. Pesaje de cuerda 2



Figura 18. Pesaje de cuerda 3



Figura 19. Pesaje de cuerda 4



Figura 20. Pesaje de cuerda 5



Se asumió que la densidad lineal de las cuerdas tanto de teflón, silicón y nylon es la misma. Esto con el objetivo de poder comparar las deformaciones sabiendo que la tensión es la misma. En la siguiente tabla se presenta qué diámetro se utilizó en las cuerdas respectivas a cada vocal.

Cuadro 7. Tabla de peso y largo por cuerda

No. de cuerda (Letra)	Diámetro (in)	Peso (g)	Largo (m)
1. (A)	0.028	0.31	0.152
3. (I)	0.032	0.40	0.152
2. (E)	0.040	0.69	0.150
4. (O)	0.029	1.95	0.150
5. (U)	0.035	3.50	0.120

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8. Cálculo de densidad lineal

Largo				Peso				μ (kg/m)	
12	cm	0.120	m	3.5	g	0.0035	kg	0.02917	μ cuerda 1
15	cm	0.150	m	1.95	g	0.00195	kg	0.01300	μ cuerda 2
15	cm	0.150	m	0.69	g	0.00069	kg	0.00460	μ cuerda 3
15.2	cm	0.152	m	0.4	g	0.0004	kg	0.00263	μ cuerda 4
15.2	cm	0.152	m	0.31	g	0.00031	kg	0.00204	μ cuerda 5

Fuente: Elaboración propia

Como tenemos determinada la frecuencia a la que queremos que la cuerda vibre, entonces se busca obtener la tensión a la que esta replicará ese modo de vibración. Para llegar a la tensión,

primero se debe calcular la velocidad de propagación de la onda utilizando la ecuación 10 y se obtienen los siguientes valores (Cuadro 9). Se utilizó un largo de 0.3 m como se explicó en la sección de parámetros.

Cuadro 9.Resultado de velocidad de propagación de onda

	Hombres			
	Formante 1 (Hz)	Formante 2 (Hz)	Velocidad F1 (m/s)	Velocidad F2 (m/s)
a	699	1471	419	883
e	457	1926	274	1156
i	313	2200	188	1320
o	495	1070	297	642
u	349	877	209	526

Fuente: Elaboración propia

Se obtienen dos velocidades ya que se realizan los cálculos para cada uno de los formantes que se van a replicar. Finalmente, con la velocidad de propagación se puede calcular la tensión necesaria en cada cuerda con la ecuación 9 (Cuadro 10).

Cuadro 10.Tensión requerida para las cuerdas en hombres

	Hombres	
	Tension 1 (N)	Tension 2 (N)
a	359	1,589
e	346	6,143
i	93	4,585
o	1,147	5,358
u	1,279	8,076

Fuente: Elaboración propia

Se calculó el esfuerzo que debe soportar cada cuerda a partir de la variación de la ecuación 9. (Cuadro 11). Para utilizar la variación de la ecuación 9, se investigó la densidad de cada material para poder determinar la presión a partir del largo de la cuerda y la velocidad ya calculada.

Cuadro 11. Esfuerzos requeridos para las cuerdas en hombres

		Tensión 1	Tensión 2
	Densidad Nylon (kg/m ³)	Presión (MPa)	Presión (MPa)
cuerda 1 (A)	1150	202	896
cuerda 2 (E)		86	1,536
cuerda 3 (I)		41	2,004
cuerda 4 (O)		101	474
cuerda 5 (U)		50	318
	Densidad Teflon (kg/m ³)	Presión (MPa)	Presión (MPa)
cuerda 1 (A)	216000	37,994	168,260
cuerda 2 (E)		16,240	288,449
cuerda 3 (I)		7,618	376,358
cuerda 4 (O)		19,053	89,027
cuerda 5 (U)		9,471	59,807
	Densidad Hule de Silicón	Presión (MPa)	Presión (MPa)
cuerda 1 (A)	15500	2,726	12,074
cuerda 2 (E)		1,165	20,699
cuerda 3 (I)		547	27,007
cuerda 4 (O)		1,367	6,389
cuerda 5 (U)		680	4,292

Fuente: Elaboración propia

D. RESULTADOS

Se realizaron análisis en ANSYS donde se aplicaron las tensiones calculadas a cada cuerda para conocer el comportamiento de estas, se realizaron análisis de deformación para conocer cuánto se deforma la cuerda dependiendo del material. También se realizaron análisis de tensión von Mises para conocer donde fallarían las cuerdas y qué cuerdas, dependiendo del material, fallarían antes. Sin embargo, el software no realizaba el análisis para el largo de cuerda real, por lo que se realizó una proporción, se calculó el 3% de la cuerda, aplicando el 3% de la carga. A partir de esos análisis se obtuvieron los siguientes resultados, ver imágenes en anexos.

Cuadro 12. Valores obtenidos en ANSYS

Cuerda	Deformación máxima (m)			Von Mises (GPa)		
Material	Nylon	Teflón	Silicón	Nylon	Teflón	Silicón
A1	0.12174	0.24371	0.0011409	22.795	23.958	20.13
A2	0.53125	1.0634	1.0634	99.471	104.54	104.54
E1	0.053659	0.10737	0.00050305	10.154	10.672	8.9672
E2	0.98733	1.9757	0.0092561	186.84	196.37	165
I1	0.025296	0.050626	0.00023713	4.7594	5.002	4.2033
I2	1.1636	2.3288	0.010908	218.93	230.09	193.35
O1	0.3502	0.70093	0.0032829	65.691	69.044	58.007
O2	1.6583	3.3191	0.015546	311.07	326.95	274.68
U1	0.26714	0.5346	0.0025044	50.398	52.969	44.507
U2	1.7013	3.4046	0.015949	320.96	337.33	283.44

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Curva Estrés- Deformación Nylon

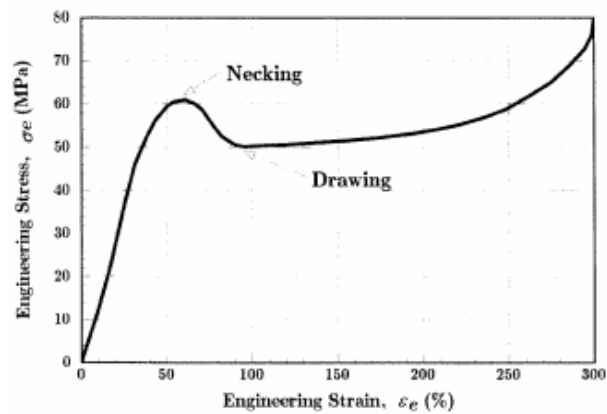
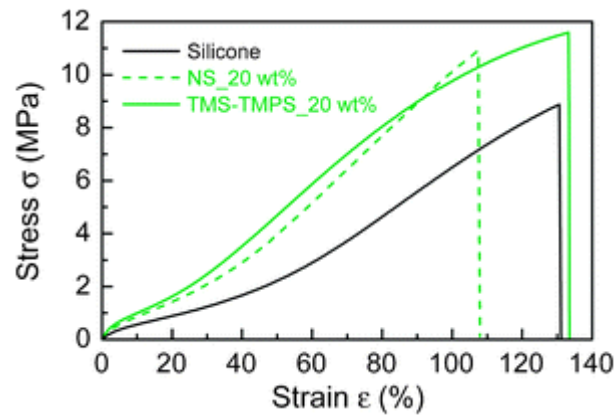


Figure 6: Stress-strain curve for polyamide (nylon) thermoplastic.

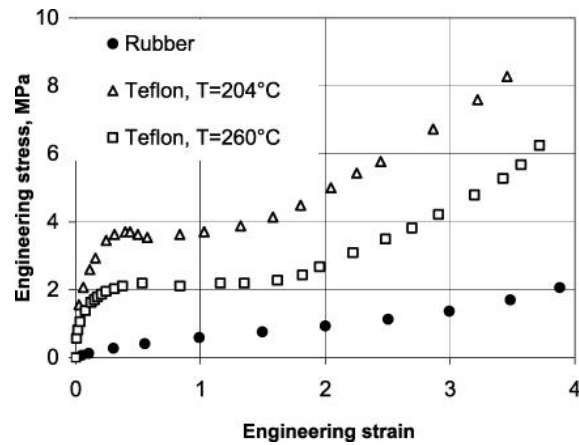
Fuente: (Roylance, 2001)

Figura 22. Curva Estrés- Deformación Silicón



Fuente: (Suzuki, 2012)

Figura 23. Curva Estrés- Deformación Teflón



Fuente: (Atrazhev, 2013)

Comparando la deformación con el largo de la cuerda utilizada para el análisis en ANSYS, podemos determinar que las deformaciones más grandes las sufre el teflón. A partir de Von Mises y el límite de elasticidad podemos saber que las deformaciones sobrepasan este y por lo tanto se pasa al área plástica.

Para eliminar la falla del material, se determinó cuál sería el diámetro que deberían tener las cuerdas. Para esto se utilizó la presión calculada anteriormente y la fórmula de $P = F/A$, con esta ecuación se despejó el diámetro del área y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 13. Cálculo de diámetros.

	Densidad Nylon (kg/m ³)	Presión (Pa)	Área (m ²)	Área (mm ²)	Diámetro (mm)
cuerda 1	1150	202,280,814	1.77E-06	1.77	2
cuerda 2		86,463,486	4.00E-06	4.00	2
cuerda 3		40,559,166	2.29E-06	2.29	2
cuerda 4		101,440,350	1.13E-05	11.30	4
cuerda 5		50,425,614	2.54E-05	25.36	6
	Densidad Teflon (kg/m ³)	Presión (Pa)	Área (m ²)	Área (mm ²)	Diámetro (mm)
cuerda 1	216000	37,993,613,760	9.44201E-09	0.009	0.11
cuerda 2		16,240,098,240	2.12963E-08	0.021	0.16
cuerda 3		7,618,069,440	1.21832E-08	0.012	0.12
cuerda 4		19,053,144,000	6.01852E-08	0.060	0.28
cuerda 5		9,471,245,760	1.35031E-07	0.135	0.41
	Densidad Hule de Silicón	Presión (Pa)	Área (m ²)	Área (mm ²)	Diámetro (mm)
cuerda 1	15500	2,726,393,580	1.32E-07	0.13	0.41
cuerda 2		1,165,377,420	2.97E-07	0.30	0.61
cuerda 3		546,667,020	1.70E-07	0.17	0.46
cuerda 4		1,367,239,500	8.39E-07	0.84	1.03
cuerda 5		679,649,580	1.88E-06	1.88	1.55

Fuente: Elaboración propia

Para realizar las pruebas con el prototipo y las cuerdas de nylon, se debía tensar las cuerdas con las tensiones calculadas. Sin embargo, por falta de un dinamómetro que tuviese la capacidad necesaria, se decidió encontrar una nota musical correspondiente para cada frecuencia y se utilizó la aplicación “Tuner – gStrings” de Samsung para afinar cada una de las cuerdas.

Figura 24. “Tuner – gStrings”



Se utilizó el valor de la frecuencia mostrada en la aplicación para saber cuándo se obtenía la nota y frecuencia deseada. Para el primer formante se pudieron afinar las cuerdas para i, e y a, para o y u, la cuerda llegaba a su límite y se reventaba. Para el segundo formante, no se pudieron

afinar ninguna de las cuerdas ya que las frecuencias son muy altas y las cuerdas se reventaron antes de poder alcanzar la tensión deseada.

Una vez obtenidas las frecuencias deseadas en las cuerdas se utilizó el software Praat para hacer el análisis espectral. Este consiste en descomponer los datos recopilados, en este caso el sonido, en componentes cíclicos. Con el análisis espectral se puede obtener la intensidad del sonido, el espectro del sonido, tono y los formantes del sonido. Se tocó cada cuerda por separado para realizar una grabación y a esto se le realizó el análisis. El análisis espectral de los primeros formantes de las letras A, E e I son los siguientes.

Figura 25. Análisis espectral prueba formante 1 - A

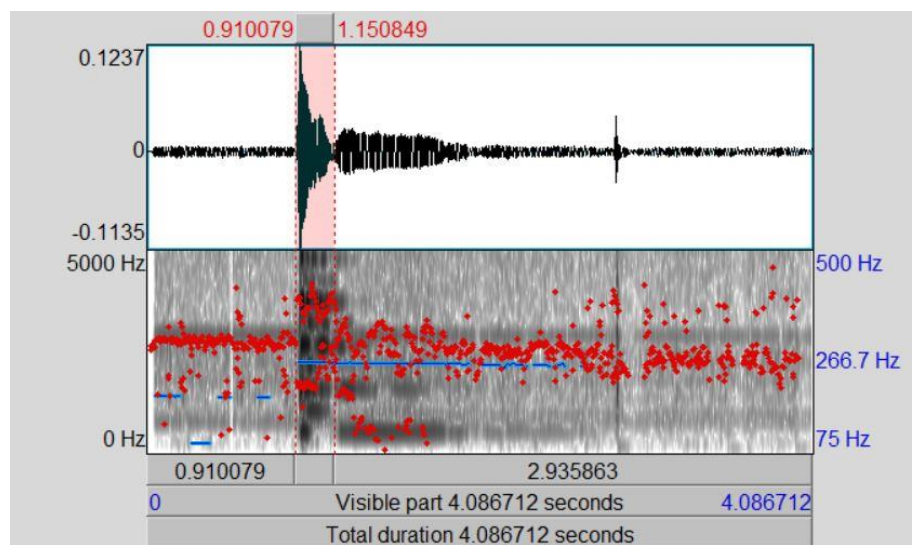


Figura 26. Análisis espectral prueba formante 1 – E

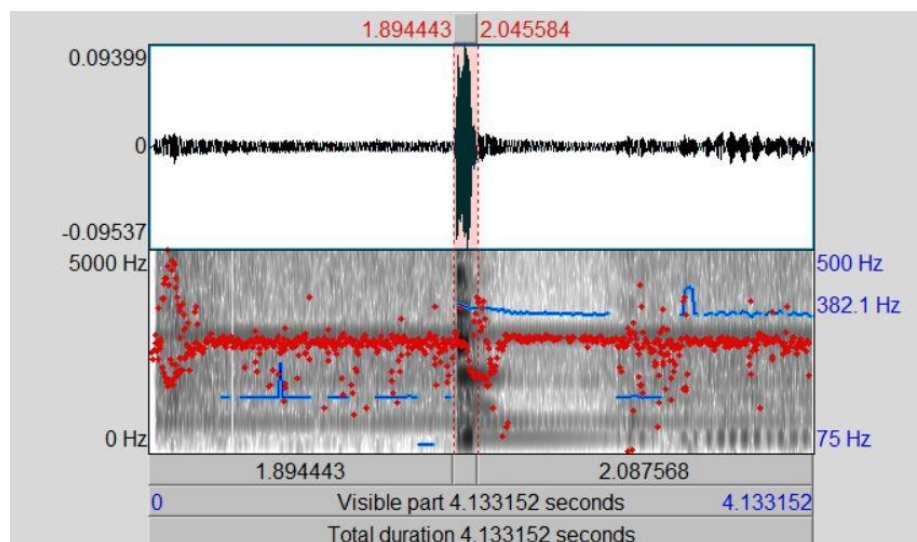
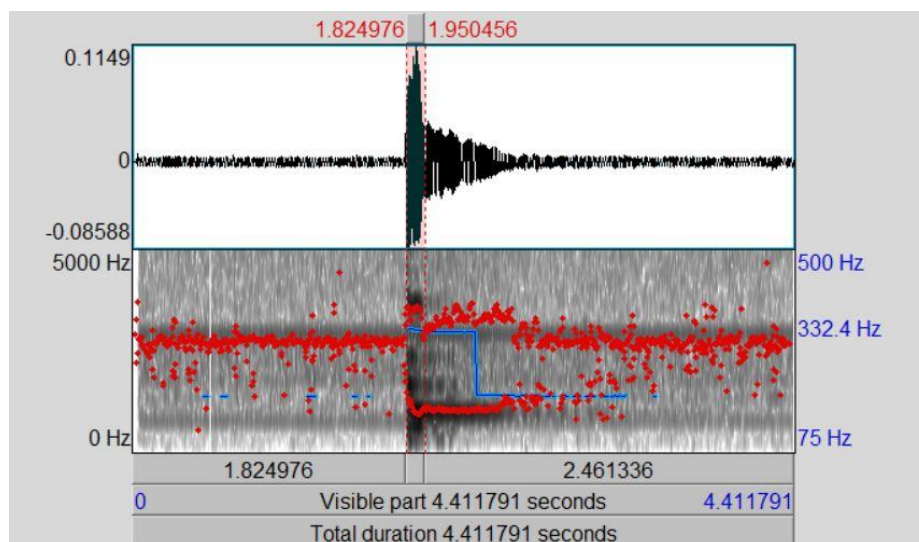


Figura 27. Análisis espectral prueba formante 1 - I



Las líneas rojas son los formantes del sonido, la línea azul es el tono y las líneas grises del fondo es el espectro. Para cada grabación se obtuvo el primer formante para determinar si este coincide o no con los formantes deseados. El primer formante representa al formante más bajo del sonido que se está analizando.

Cuadro 14. Primer formante pruebas

Letra	Formante 1 (Hz)	Error (%)
A	1951.89	179
E	2431.64	432
I	1119.82	258

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis espectral del sonido de la letra a partir de los formantes teóricos investigados. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 28. Análisis espectral – A

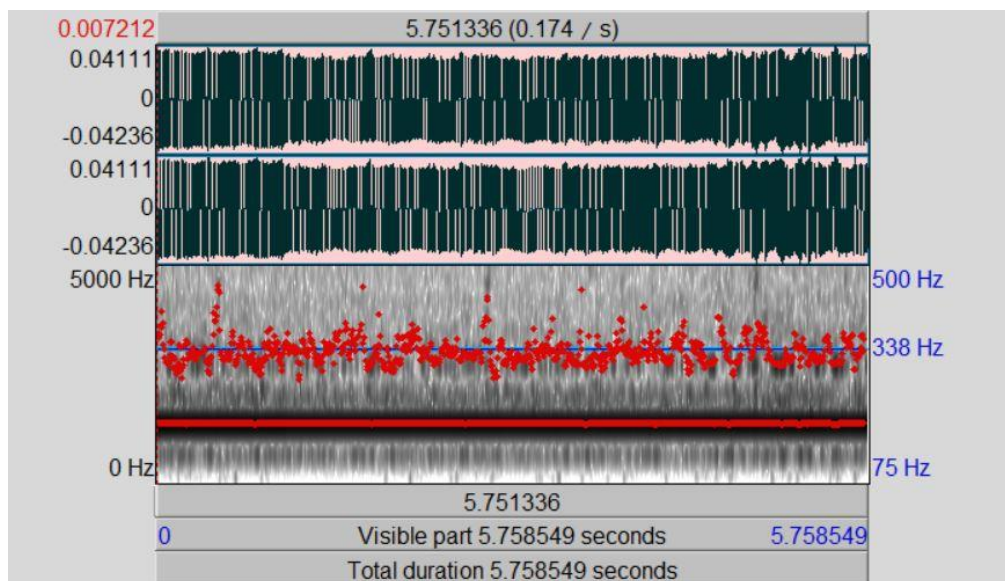


Figura 29. Análisis espectral – E

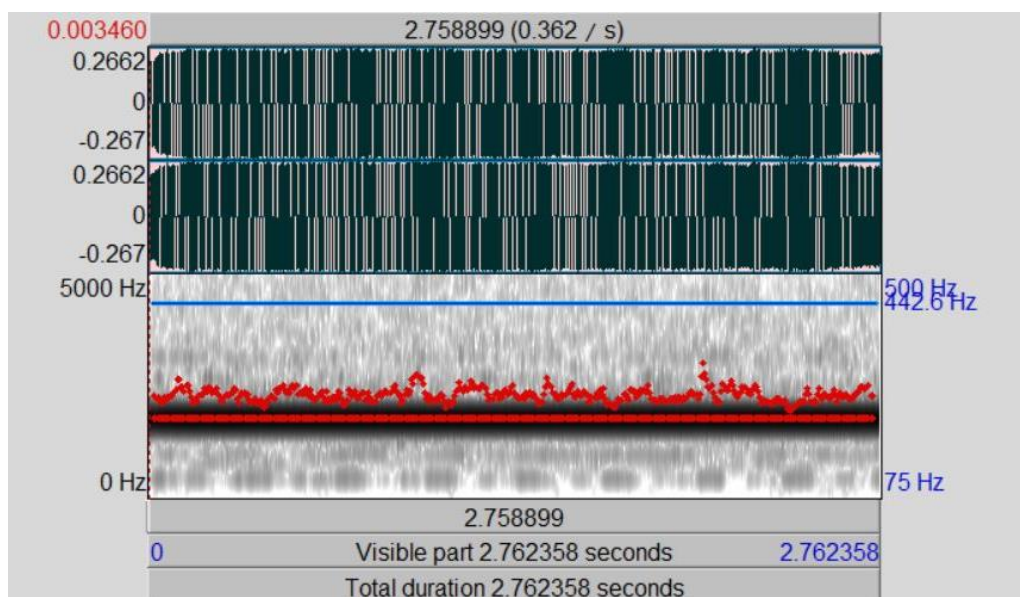


Figura 30. Análisis espectral – I

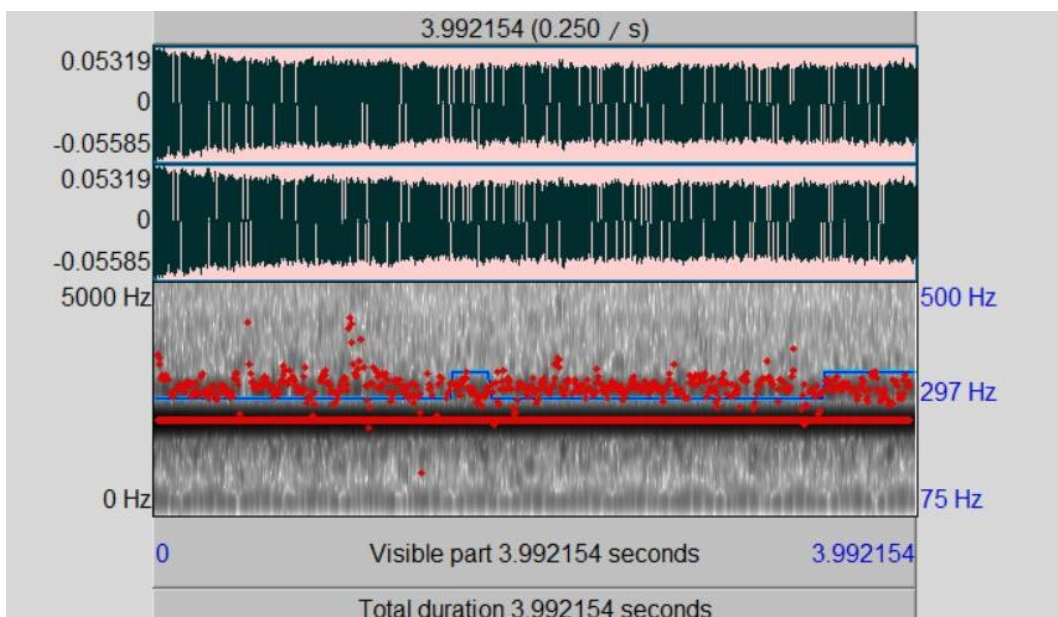


Figura 31. Análisis espectral – O

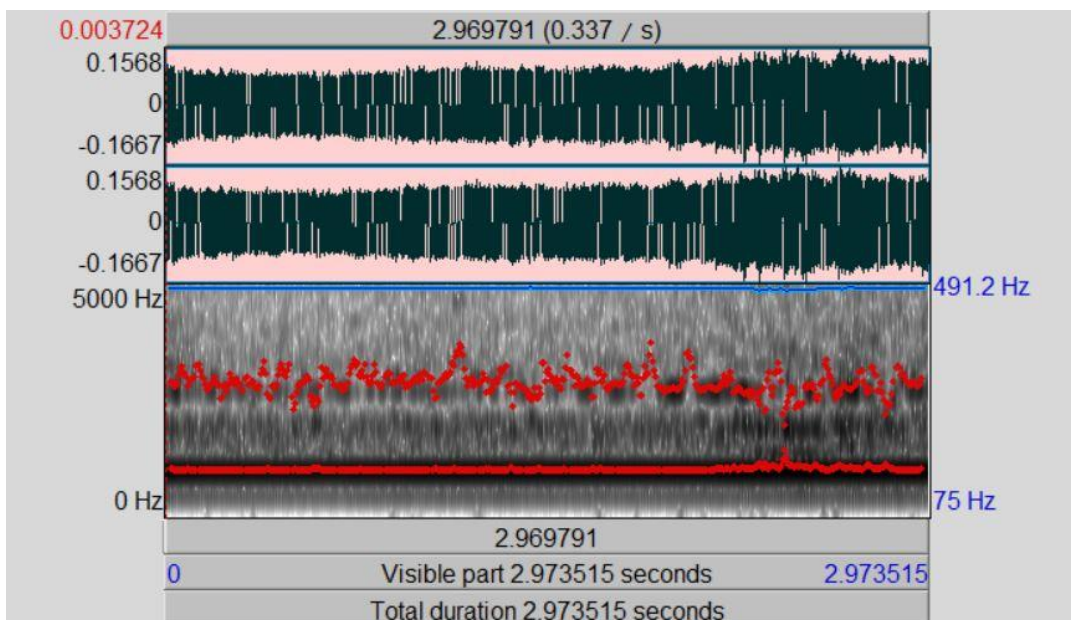
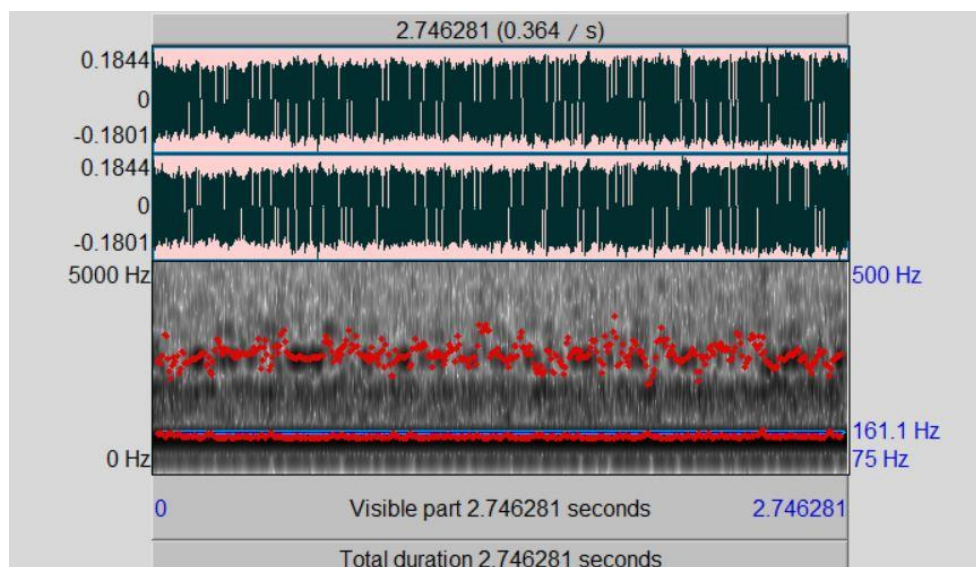


Figura 32. Análisis espectral – U



Cuadro 15. Formantes

Letra	Formante 1 (Hz)	Formante 1 (Hz)	Error (%)
A	1354.21	2995.22	94% -104%
E	1770.19	2283.29	287% - 19%
I	2019.03	2737.41	545% - 20%
O	993.70	2715.76	101% - 154%
U	871.63	2787.16	150% - 218%

Fuente: Elaboración propia

Al presentar el prototipo en ASEDES, se obtuvo la siguiente retroalimentación. El color les pareció adecuado, sin embargo, les gustaría que llevara los colores de la organización. Les pareció muy pesado para trasladarlo al salón en que se fuese a realizar la terapia, por lo que, recomendaron que el marco se realizara de un material más liviano. También sugirieron que el dispositivo simulara las vibraciones de las vocales y de ciertos fonemas con los que tiene problemas. De los aspectos positivos del prototipo es que al tener forma de guitarra a los niños les llamó más la atención y que la vibración si es perceptible. Finalmente, se probó que el tamaño de este fuera apto tanto para niños como adultos, ya que quisieran aplicarlo con todas las personas que reciben terapia.

E. DISCUSIÓN

Al realizar la afinación de las cuerdas se presentaron varios problemas. Debido al largo determinado y el material de nylon, las cuerdas necesitan tensiones muy grandes para vibrar en las frecuencias determinadas. Esto es un problema ya que se revientan las cuerdas antes de llegar a la deseada. Esto se da debido a que las cuerdas son muy delgadas para las tensiones que deben soportar. Este problema se puede resolver al disminuir la longitud que debe tensarse, es decir reducir el tamaño de prototipo, sin embargo, se estaría pasando por alto uno de los requisitos más importantes para ASEDES. Otra opción es cambiar el diámetro de las cuerdas y utilizar cuerdas con diámetros más grandes o más pequeños dependiendo de qué material se va a probar.

Era importante determinar la vida útil de las cuerdas de nylon porque este material influye directamente en el costo del equipo. Esto es necesario ya que entre más frecuente se realice el cambio de cuerdas, el mantenimiento del equipo será más costoso. Además, las pruebas con las cuerdas ayudaron a conocer las fallas con la estructura, como los acabados en las ranuras de los puentes y que el tipo de material utilizado en esta área no fue el mejor, pues el roce de las cuerdas en las ranuras de los puentes, al ser de hierro, contribuyó a que las cuerdas fallen más rápidamente.

Se calculó que diámetro deberían de tener las cuerdas si todas tuvieran la misma densidad lineal (Cuadro13). Con el material que se obtuvieron diámetros menores fue con el teflón, esto quiere decir que, a partir de esta consideración, si las cuerdas con las que se probó el prototipo fueran de teflón, estas serían menos propensas a reventarse y se podrían alcanzar las frecuencias requeridas. Sin embargo, se podrían reutilizar las cuerdas de nylon, con los mismos diámetros, pero cambiar la longitud para que la tensión en estas sea menor para poder alcanzar las frecuencias deseadas.

Para saber cómo se comportarían las cuerdas a partir de las tensiones calculadas, se realizaron análisis de las cuerdas de nylon, teflón y silicón en ANSYS, se realizaron simulaciones de deformación total y esfuerzo con Von Mises para saber qué material es el que mejor se adecua. Con las simulaciones de deformación sabemos dónde sufre mayor deformación la cuerda y el valor de esta deformación. Comparando los resultados mostrados en el Cuadro 12, sabemos que las deformaciones más pequeñas las sufre el silicón. Esto se debe a que tiene un alto módulo de Young, lo que le significa una mayor capacidad de elongación sin deformación permanente, lo cual es clave para el movimiento de las cuerdas vocales. Ya que en caso existe una deformación permanente se dan parálisis u otros problemas en la laringe. En este caso se utilizó la siguiente mejor opción, nylon, debido a la facilidad de adquisición en la forma requerida.

Por otro lado, la deformación de Von Mises nos indica donde se van a dar las primeras deformaciones plásticas en el material. Si observamos el análisis de elementos finitos realizado (Anexos 3-5), sabemos que es en las orillas de la circunferencia que se comenzaran a dar estas deformaciones (2). Analizando los datos del Cuadro 12, los valores sobrepasan el límite de elasticidad (Cuadro 5) y por lo tanto en donde se dan las primeras fallas. Además, las Figuras 21, 22 y 23 nos demuestran que los esfuerzos sobrepasan el límite de elasticidad y la deformación pasa al área plástica del material. Los esfuerzos Von Mises son menores en el silicón, lo que nos indica que esta falla tardará más en suceder que en el teflón o en el nylon.

Los grandes porcentajes de error entre los valores teóricos y prácticos se pueden deber a la grabación del sonido. Hay que tener en cuenta que la grabación no contiene el sonido tan limpio ya que se realizó con un micrófono de computadora, si se realiza la grabación con un micrófono direccional profesional donde se capte el menor ruido externo posible, mejor serán los análisis. Además, una de las grandes características del sonido es que cambia dependiendo del tipo de resonadores que utiliza, y de la posición en que están colocados. Por lo tanto, puede que la caja de resonancia también sea un obstáculo para llegar al resultado esperado.

Por otro lado, existen los errores que se dan al realizar análisis espectrales. Existen el error de fugas que se da a partir de la continuidad de los ciclos fuera de la ventana de tiempo que se está analizando. Gracias a esto se dan discontinuidades que pueden afectar las regiones de frecuencia y se presenta como frecuencias adicionales en el espectro. Entonces, este fenómeno se da más cuando se analizan señales no periódicas, como es el caso de las señales de los sonidos de las cuerdas (Alameda, 2010). Si el sonido de las cuerdas se hubiese grabado como una señal periódica, es más probable que se obtengan resultados con menores errores.

Como se sabe, los formantes no varían mucho si varía el timbre de voz de una persona. Sin embargo, el timbre de un instrumento y el de la voz humana no son equivalentes ya que el timbre de un instrumento se deriva del número y disposición de los armónicos de un sonido fundamental (Iribar, s.f.). Es decir, que el timbre de un instrumento depende de los acordes y en que octava se encuentren estos.

A partir de este prototipo se pudo determinar que el sistema continuo es la mejor opción ya que de esta manera se reduce el error. A partir del modelo de Titze y Brad, se sabe que al momento en que las cuerdas colisionan la energía se distribuye a través de la masa. Sin embargo, si se tratan las cuerdas vocales como masas, entonces la colisión se comporta como que la energía se disipara justo después de esta la colisión se detiene en ese momento, por lo que no es natural.

A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que realizar un prototipo tipo instrumento con cuerdas no es el más adecuado para la simulación de la vibración de las cuerdas vocales. Ya que existen porcentajes de error muy grandes (Cuadros 14 y 15) y a que las cuerdas necesitan de una presión constante, como la del aire, para producir la vibración. La presión del aire es muy importante ya que esta determina cómo van a vibrar las cuerdas vocales.

VI. CONCLUSIONES

1. Se realizó un prototipo a partir de la teoría de Ferrain, en la cual se asume que las cuerdas vocales se comportan como las cuerdas de un violín. Se agregaron los factores importantes por los que esta teoría fallaba para determinar si así se obtenía un dispositivo funcional y de bajo costo.
2. Se determinaron las tensiones a las que deberían ser sometidas las cuerdas del dispositivo para alcanzar las frecuencias deseadas. Los valores van de 93 a 8,000 N, algunos de estos son muy grandes por lo que las deformaciones en las cuerdas aparecieron rápidamente, lo que indica que la longitud de las cuerdas o el material no es adecuada para la aplicación.
3. Las variaciones entre las frecuencias deseadas y las obtenidas se muestran en los porcentajes de error obtenidos al realizar pruebas, yendo desde el 94% al 500%. Esto indica que no se pudo obtener la simulación de las vocales debió a las fallas en las cuerdas ya que eran muy delgadas y largas para alcanzar las tensiones deseadas. No se obtuvieron las frecuencias más altas (segundo formante) y para las frecuencias bajas (primer formante) de las vocales A, E, I, se logró obtener las primeras tres.
4. Al realizar las simulaciones en ANSYS con los tres materiales y comparando resultados, se puede concluir que el silicón es quien sufre menores deformaciones, de a 2.37×10^4 m a 1.06 m, a partir de la tensión aplicada. Además, la curva esfuerzo deformación del silicón es la que más similar a la de las cuerdas vocales. Es por esto que el mejor material a probar con el prototipo es el silicón.
5. Luego de realizar pruebas en ASEDES, se pudo determinar que la vibración de las cuerdas es perceptible, sin embargo, se debe amplificar el sonido; se debe de reducir el peso de la estructura para su fácil movilidad y el material para evitar que las cuerdas se rompan con facilidad; mantener el aspecto interactivo y colorido del prototipo pues aumenta el interés de los niños.

VII. RECOMENDACIONES

1. Para una siguiente etapa se pueden realizar pruebas con diámetros más grandes para las cuerdas de nylon u otro material. Pueden utilizarse los materiales calculados en este trabajo o investigar y utilizar otros materiales. También se puede mejorar el peso del prototipo al hacer la estructura de aluminio, madera o "huesillo" del que están contruidos los puentes de las guitarras acústicas.
2. Se puede crear un segundo prototipo que, en lugar de utilizar cuerdas, utilice una masa continua delgada que vibre a través de la presión de aire. Para esto se puede utilizar la ecuación de Bernoulli para calcular un aproximado de las presiones necesarias ya que durante el proceso del habla existe un momento donde la presión es constante.
3. Se puede realizar un prototipo utilizando el modelo de Brand y Titze, tomando en cuenta que los valores de los amortiguadores y resortes son muy pequeños, por lo que, estos deberían ser fabricados a la medida o recalculados para un prototipo más grande.
4. Asegurarse de contar con las herramientas adecuadas para las mediciones de frecuencias y vibraciones para que esto no sea un obstáculo al realizar las pruebas con los prototipos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alameda, A. 2010. *Guía para el procesamiento y análisis de señales. Aplicación a la diagnosis de rodamientos*. Madrid: Universidad Carlos III .
2. ANSYS. *Lecture 5 : Rate Independent Plasticity*.
http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab7.pdf [05/10/2016]
3. ARTISAM. Capítulo 15. <http://www.artisam.org/descargas/pdf/POLIMEROS.pdf> [14/09/2016]
4. Atrazhev, V. *et al.* 2013. «Stalled phase transition model of high-elastic polymer». *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2013, 2004.
5. Bearin Works. (PTFE) *Polytetrafluoroethylene*. <https://www.bearingworks.com/uploaded-assets/pdfs/retainers/ptfe-datasheet.pdf> [20/08/2016]
6. Black, Jonathan; G. Hastings. 1998. *Handbook of Biomaterials Properties*. Londres: Chapman & Hall.
7. Blog de Nuevas Tecnologías. *Tecnologías de Ayuda para Personas con Discapacidad Auditiva*. <https://abrahambartual.wordpress.com/ayudas-tecnicas-en-sordera/> [18/07/2016]
8. Borden, G.; Harris, K.; Raphael, L. 1994. *Speech science primer. Physiology, acoustics and perception of speech*. 3a. ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.
9. Burbano, Gabriela. 2005. «Situación Actual de la Educación Especial en Guatemala.» Asociación de Capacitación y Asistencia Técnica en Educación y Discapacidad. 199 págs.
10. Cataldo, Edson, *et al.* 2005. «Synthesis of voiced sounds using low-dimensional models of the vocal cords and time-varying subglottal pressure». *Mechanics Research Communications*. 33 (2006): 250–260
11. Crochet Rockers. *Hand Size Chart*. <http://www.crochetochelle.com/2012/08/hand-size-chart.html> [06/09/2016]
12. Deaf Child Worldwide. *Concienciación de la sordera: Hoja informativa*.
http://www.deafchildworldwide.info/publications_and_resources/index.html [10/08/2016]
13. Dembinski, D, *et al.* 2014. «Biomechanical measurements of vocal fold elasticity». *OA Tissue Engineering*. 2(1):3.
14. Dosal, Raquel. 2014. «Producción de la Voz y el Habla: La Fonación.» Universidad de Cantabria. 27 págs.
15. ESSOM. *Moduli of elasticity and poisson's ratio*.
http://www.essom.com/upload/eng_data/23.pdf [14/09/2016]
16. Fernández, Teresa. 2001. *Donde Termina la Palabra: La Música Como Terapia*. México: Plaza y Valdés. 53 págs.
17. FIAPAS. *¿Qué es sordera?* <http://www.fiapas.es/FIAPAS/queeslasordera.html> [18/07/2016]

18. Groover, Mikell. 1997. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice Hall. 1063 págs.
19. Gunter, Heather. 2003. «Mechanical Stresses in Vocal Fold Tissue during Voice Production. » Harvard University. 105 págs.
20. HyperPhysics. Formantes de Vocales. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/music/vowel.html> [10/08/2016]
21. INE. 2013. *Resumen Ejecutivo del Compendio Estadístico sobre la Situación de Niñas Adolescentes*. <http://www.unfpa.org.gt/sites/default/files/Resumen%20ejecutivo%20ni%C3%B1as%20y%20adolescentes.pdf> [17/07/2016]
22. INE. 2015. *Indicadores Sociodemográficos: Proyecciones de Población, Tasa de Crecimiento Poblacional*. <https://www.ine.gob.gt/index.php/estadisticas/tema-indicadores> [17/07/2016]
23. INTECAP. 2005. *Consulta de Necesidades de Capacitación de Grupos Vulnerables: Personas con Discapacidad*. <http://www.intecap.edu.gt/oml/images/pdfsdocumentos/CNC-08.pdf> [21/07/2016]
24. Iribar, A. *Caracterización de los segmentos fonéticos*. <http://paginaspersonales.deusto.es/airibar/Fonetica/Apuntes/06.html> [05/10/16]
25. Irigoyen, Iliana; M. Ramos. 2008. *Aplicaciones Psicoacústicas*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional. 245 págs.
26. Jansson, Erik. 2002. *Chapter IV: Properties of the Violin and the Guitar String. Acoustics for violin and guitar makers*. 4ta. Ed. Suecia: Universidad de Estocolmo.
27. Maggio, Mariana. 2004. «Terapia Auditivo Verbal. Enseñar a escuchar para aprender a hablar.» *Auditio: Revista electrónica de audiología*. 2(3), 64-73.
28. Mark. E. 2007. *Physical Properties of Polymers Handbook*. EEUU: Springer. 1073 págs.
29. Márquez, Segismundo. 2010. *Estudio de los Receptores del Tacto y el Equilibrio en el Ser Humano*. <http://www.cac.es/cursomotivar/resources/document/2010/6.pdf> [06/09/2016]
30. Martínez, Eugenio. 1995. En torno a las Vocales del Español: Análisis y Reconocimiento. *Estudios de Fonética Experimental, VII*, 196-218.
31. MATBASE. PA6. <https://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/engineering-polymers/material-properties-of-polyamide-6-nylon-6-pa-6.html#properties> [20/08/2016].
32. MEMS. Material: Silicon (Si), bulk. <https://www.memsnet.org/material/siliconsibulk/> [15/09/2016]
33. Montes, Domingo. *Caracterización Acústica de las Vocales del Español*. http://www.domingo-roman.net/vocales_esp_caract_acustica.html [17/07/2016]

34. Otorrinoweb. 56.1ª.06 *Fisiología Laríngea: Biomecánica Vibratoria*.
<http://www.otorrinoweb.com/es/2964.html> [18/07/2016]
35. Pacheco, Luis. Campos receptivos y mecanorreceptores.
<http://163.178.103.176/Temas/Temab2N/Grupos/Houssay/CAP62/Houssay827a.jpg>
[06/09/2016]
36. *Properties for Molded PTFE*. TREBOR: <http://www.treborintl.com/content/properties-molded-ptfe> [20/08/2016]
37. Rao, Singiresu. 2012. *Vibraciones Mecánicas*. 5ª. Ed. México: Pearson. 776 Págs.
38. Reetz, Henning y Jongman, A. 2009. *Phonetics: Transcription, Production, Acoustics, and Perception*. EEUU: Wiley- Blackwell. 221págs.
39. Riede, Tobias; Titze, I. 2008. «Vocal fold elasticity of the Rocky Mountain elk (*Cervus elaphus nelsoni*) – producing high fundamental frequency vocalization with a very long vocal fold». *The Journal of Experimental Biology* 211: 2144-2154.
40. Roylance, D. 2001. *Stress-Strain Curves*. Massachusetts: MIT. <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2012/09/ME1022.2.4.pdf> [20/08/2016].
41. Salmani, Mohammad. 2008. «Language and Literacy Development in Prelingually-Deaf Children. » *I-manager's Journal on Educational Psychology*.2(2), 16-20.
42. San Jose State University. *Lectures on MEMS and Microsystems Design and Manufacture*.
http://www.engr.sjsu.edu/trhsu/ME189_Chapter%207.pdf [05/10/16].
43. Serra, Jordi. 2006. *Tratado de Dolor Neuropático*. Buenos Aires; Madrid: Médica Panamericana. 464 págs.
44. Shaw, Stephanie. 2010. «Frequency Response of Synthetic Vocal Fold Models with Linear and Nonlinear Material Properties. » Brigham Young University. 109 págs.
45. Silverthorn, Dee. 2009. *Fisiología Humana. Un Enfoque Integrado*. 4ª ed. Buenos Aires: Médica Panamericana. 980 págs.
46. State Government Victoria. Voice Production.
https://www.eduweb.vic.gov.au/edulibrary/public/ohs/voice_production.pdf [10/08/2016]
47. Story, B. I. 1995. «Voice Simulation with a Body-Cover Model of the Vocal Folds.» *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(2), 1249-1260.
48. Story, Brad. 2002. «An overview of the physiology, physics and modeling of the sound source for vowels. » *Acoust. Sci. & Tech.* 23(4), 196- 206.
49. Suarez, Carlos, *et al.* 2008. *Tratado de Otorrino laringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*. 2ª . Ed. Buenos Aires; Madrid: Médica Panamericana. 2881 págs.
50. SUMITEC. *Plásticos Grado Ingeniería: Teflón*.
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/TEFLON.pdf> [20/08/2016]

51. Suzuki, Norihiro, *et al.* 2012. «Unusual reinforcement of silicone rubber compounds containing mesoporous silica particles as inorganic fillers.» *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 10(14), 3400-3407.
52. Titze, Ingo; T. Riede. 2010. «A Cervid Vocal Fold Model Suggests Greater Glottal Efficiency in Calling at High Frequencies. » *PLoS Computational Biology* 6(8)
53. Universidad de Valladolid. *Estructura Química*. <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/teflon/paginas%20del%20menu/ESTRUCTURA%20QUIMICA.htm> [20/08/2016]
54. WHO. *Sordera y pérdida de la audición*. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/es/> [25/07/2016]
55. Wikipedia. Coeficientes de Poisson. https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constantes_el%C3%A1sticopl%C3%A1sticas_de_diferentes_materiales#Coeficiente_de_Poisson [14/09/2016]

IX. ANEXOS

Anexo 1. Requisitos

Requerimientos			
Generales			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	
P1.0	Producción de vibración	Cómo se producen las vibraciones de las cuerdas vocales	
V1.0	Formación de las vocales	Cómo se producen las vocales	
E1.0	Estructura	Estructura sencilla fácil de ensamblar	
M1.0	Materiales	Qué materiales utilizar	
A1.0	Análisis	Analizar el funcionamiento del diseño	
Producción de Vibración			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	Verificación
P1.1	Producción	Debe de conocerse cómo se dá el proceso	Teoría
P1.2	Producción	Deben de conocerse las partes involucradas	Teoría
P1.3	Producción	Deben de conocerse las partes que son más importantes	Teoría
P1.2.1	Producción	Debe de conocerse cómo se compone cada parte involucrada en el proceso	Teoría
P1.2.2	Producción	Debe de conocerse qué función tiene cada parte	Teoría
Formación de Vocales			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	Verificación
V1.1	Formación	Debe de conocerse qué partes están involucradas	Teoría
V1.2	Formación	Deben de conocerse las frecuencia a las que se producen las vocales	Teoría
V1.2.1	Formación	Debe de conocerse la variación de frecuencias entre hombre y mujeres	Teoría
Estructura			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	Verificación
E1.1	Estructura	La palma de la mano debe ser capaz de tocar el dispositivo	Pruebas ASEDES
E1.2	Estructura	Debe ser llamativa para los niños	Pruebas ASEDES
E1.3	Estructura	Debe tener un mecanismo fácil de utilizar	Pruebas ASEDES
E1.4	Estructura	Debe ser fácil de movilizar	Pruebas ASEDES
E1.5	Estructura	Deben de utilizarse materiales accesibles	Costos
E1.6	Estructura	Debe de ser interactivo para que a los niños les llame la atención	Pruebas ASEDES
E1.7	Estructura	El prototipo debe funcionar tanto para niños como para adultos	Pruebas ASEDES
Materiales			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	Verificación
M1.1	Materiales	El material de las cuerdas debe tener un modulo de Young similar o mayor a de las cuerdas vocales	Catalogos
M1.2	Materiales	El material de las cuerdas debe ser accesible	Costos
M1.3	Materiales	Deben de compararse mínimo 2 materiales para las cuerdas	ANSYS
M1.4	Materiales	Se debe de saber si el material falla o no con las tensiones calculadas	ANSYS
M1.5	Materiales	El material de construcción del prototipo debe ser accesible para eventualmente realizarlo en masa	Costos
Análisis			
Codigo	ID Concepto	Descripcion general	Verificación
A1.1	Análisis	El análisis del sistema debe de hacerse con cualquiera de las teorías investigadas	Teoría
A1.2	Análisis	El sistema debe de ser capaz de analizarse por medio de vibraciones	Praat (Frecuencias)
A1.3	Análisis	El sistema debe de ser capaz de utilizar el primer y segundo formante de las vocales	Mecanismo
A1.4	Análisis	Se debe verificar que las frecuencias sean parecidas a las investigadas	Praat (Frecuencias)
A1.5	Análisis	Se debe calcular si los diámetros utilizados son los correctos o no.	Cálculos

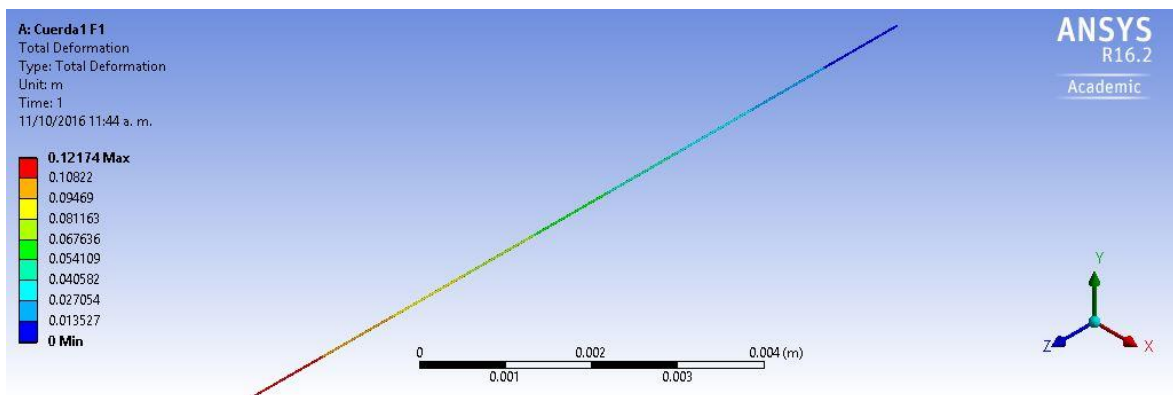
Anexo 2. Imagen del prototipo



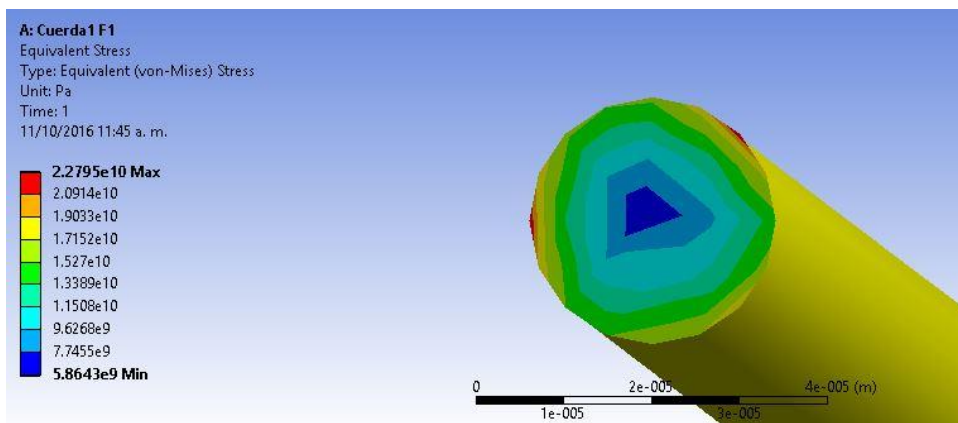


Anexo 3. Imágenes de resultados en ANSYS para nylon

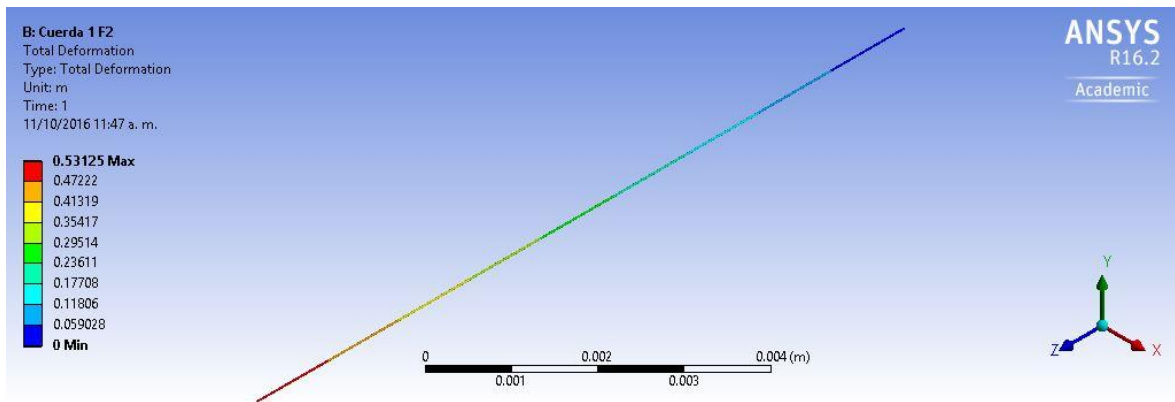
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de deformación



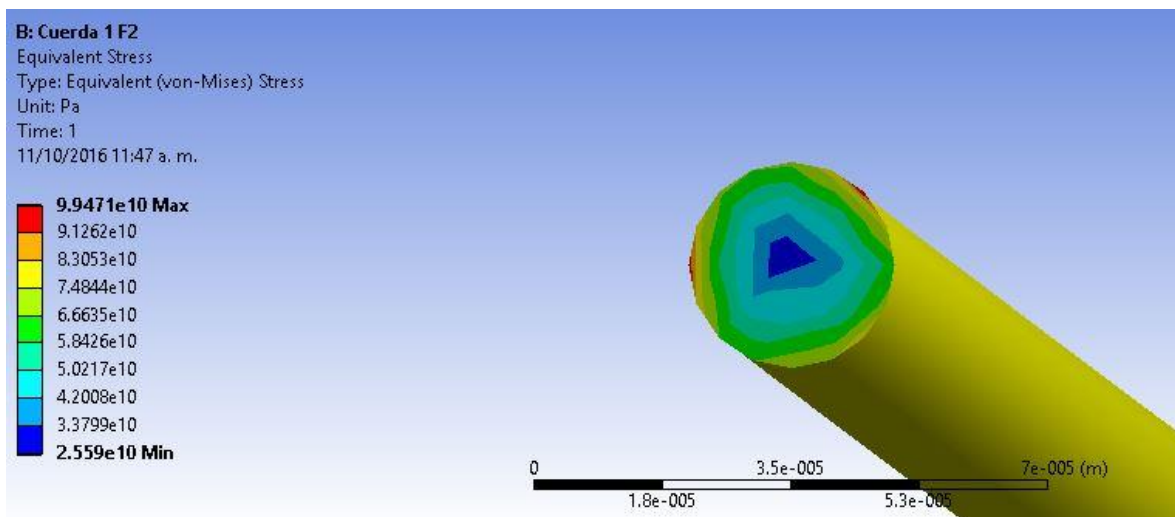
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de esfuerzos



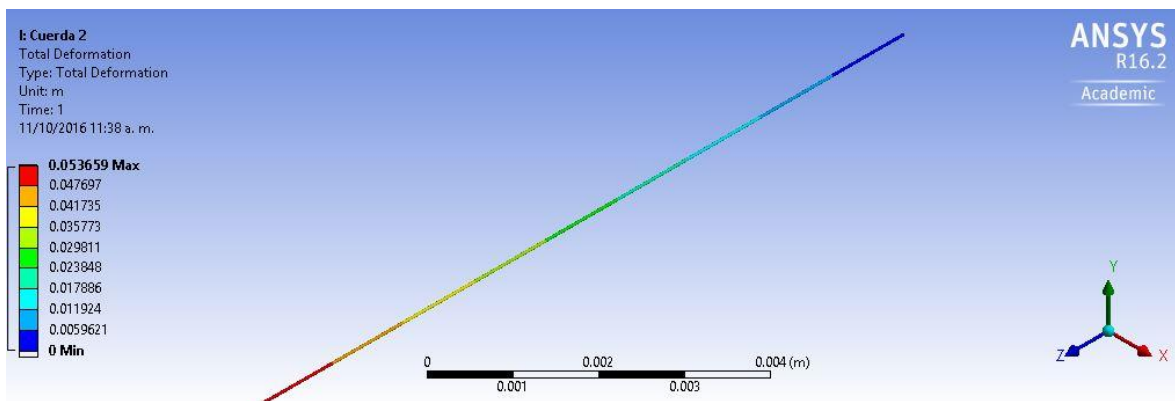
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de deformación



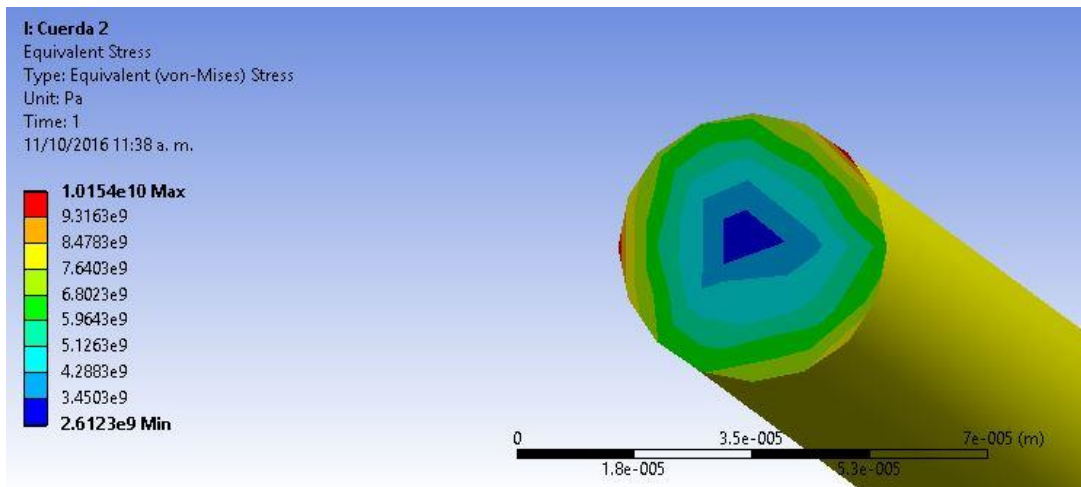
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de esfuerzos



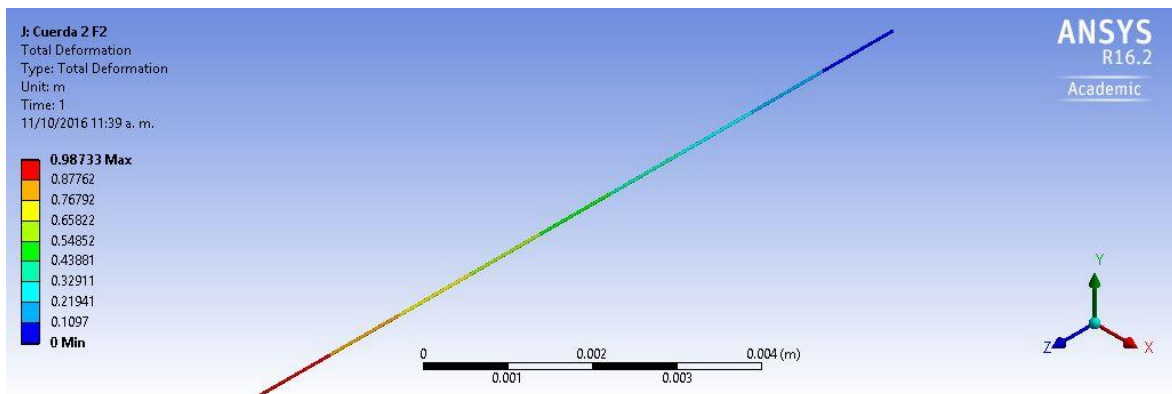
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de deformación



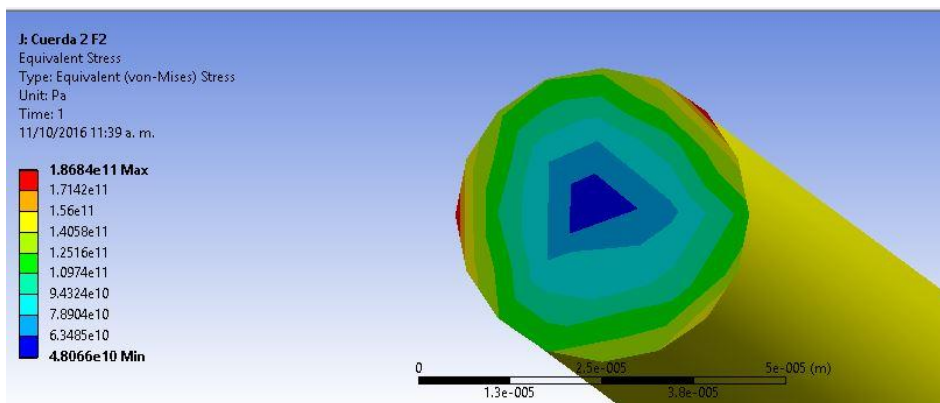
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de esfuerzos



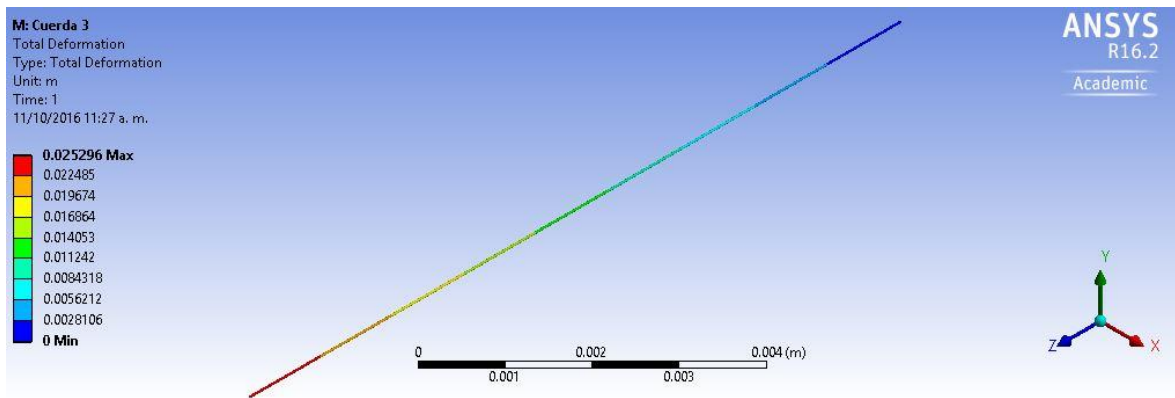
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de deformación



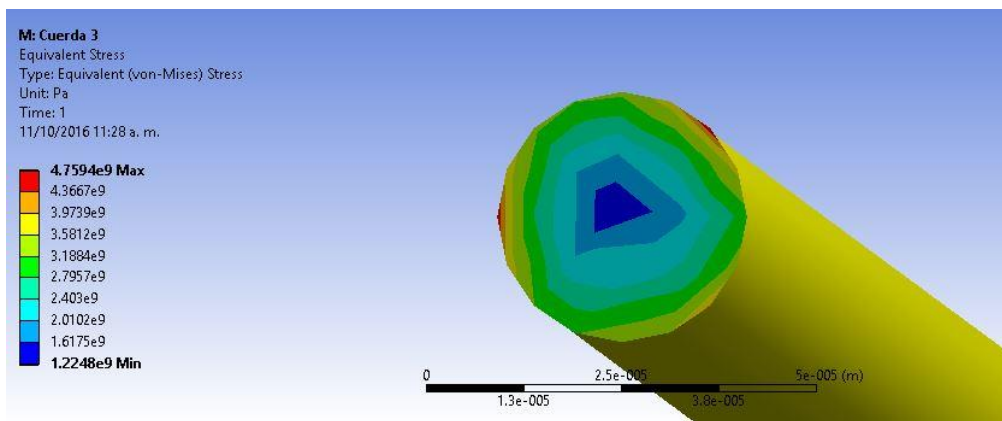
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de esfuerzos



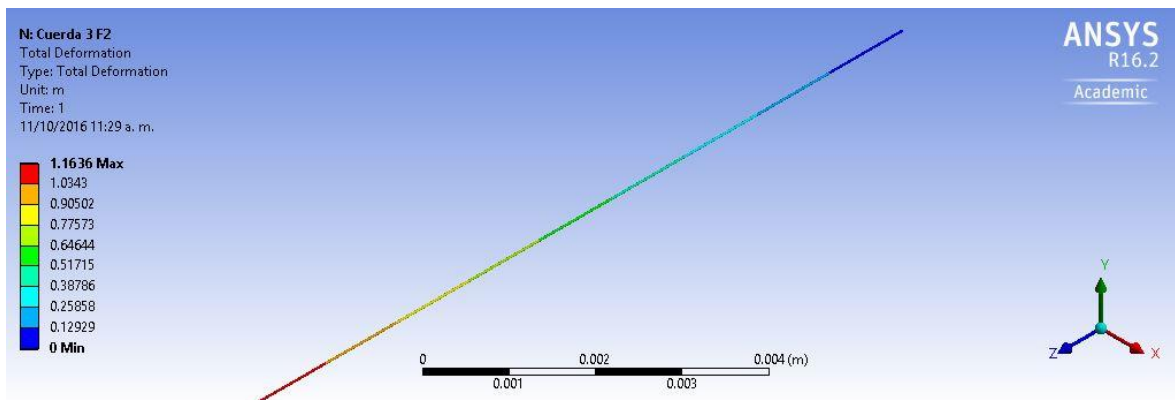
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de deformación



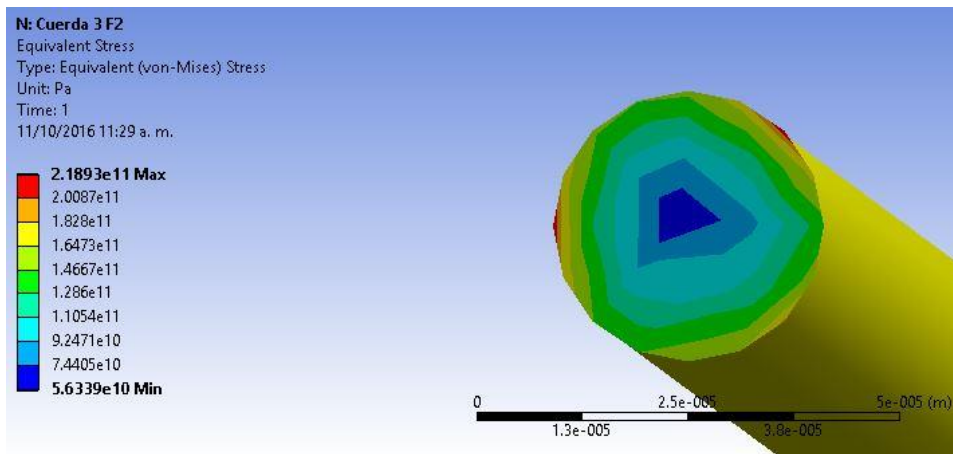
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de esfuerzos



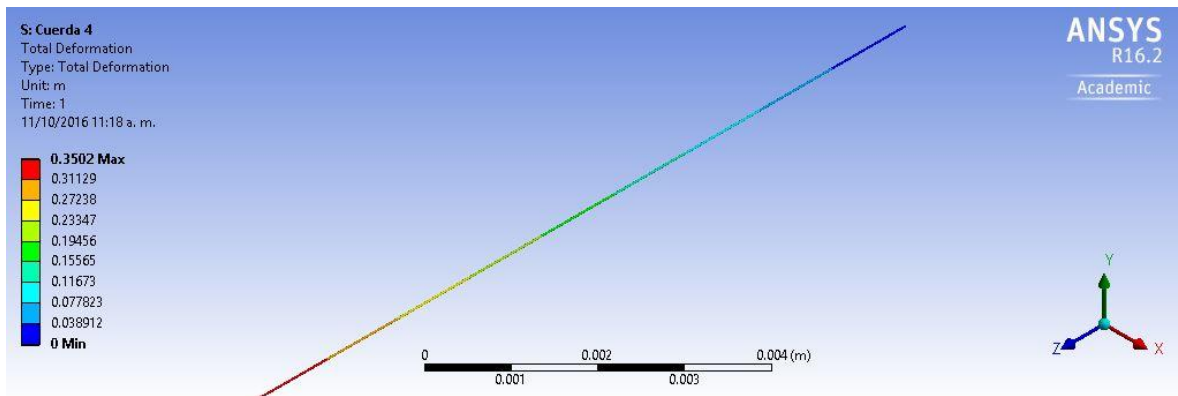
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de deformación



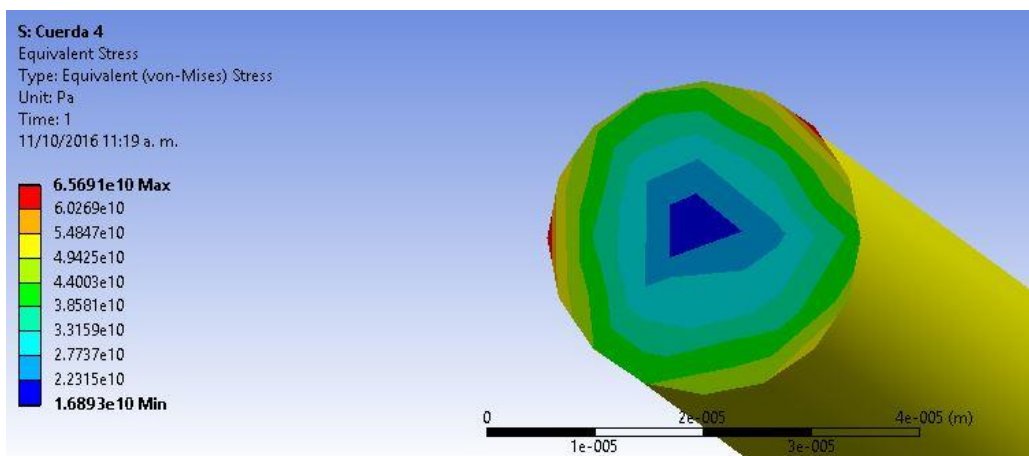
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de esfuerzos



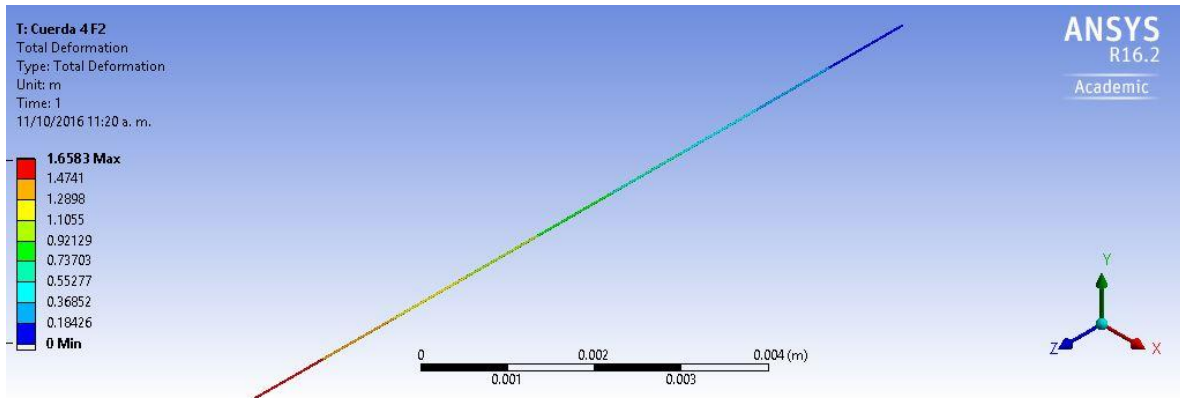
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de deformación



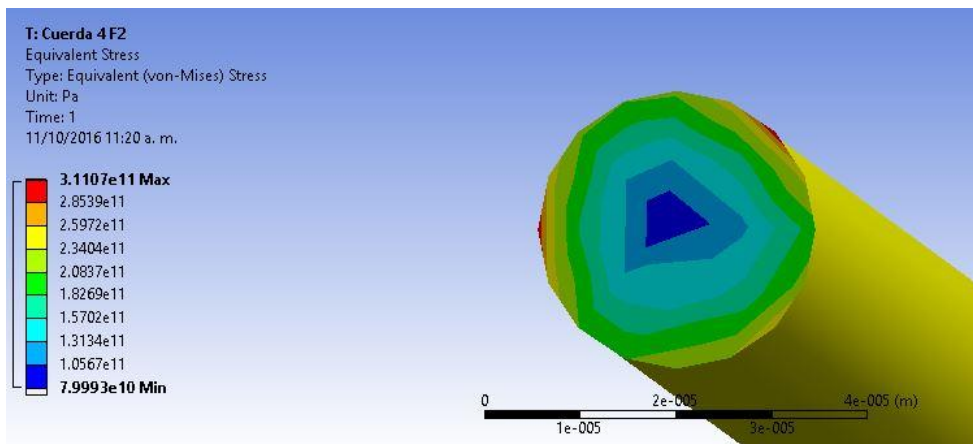
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de esfuerzos



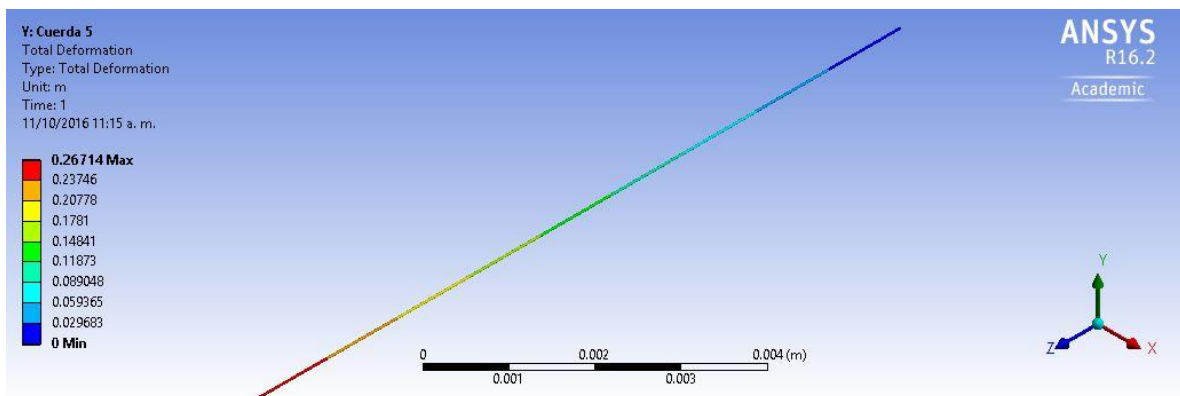
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de deformación



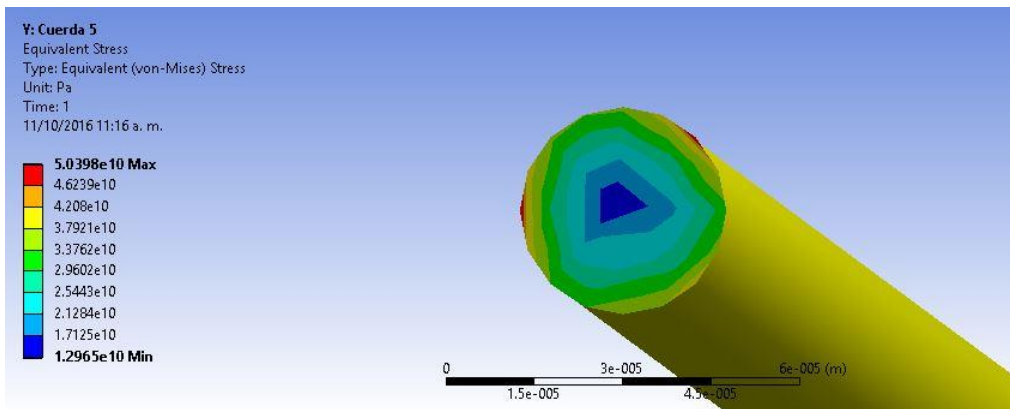
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de esfuerzos



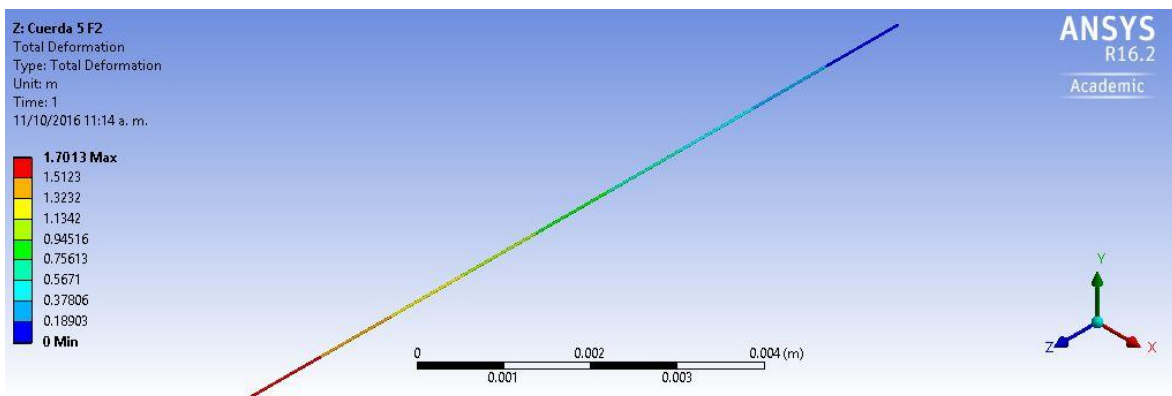
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de deformación



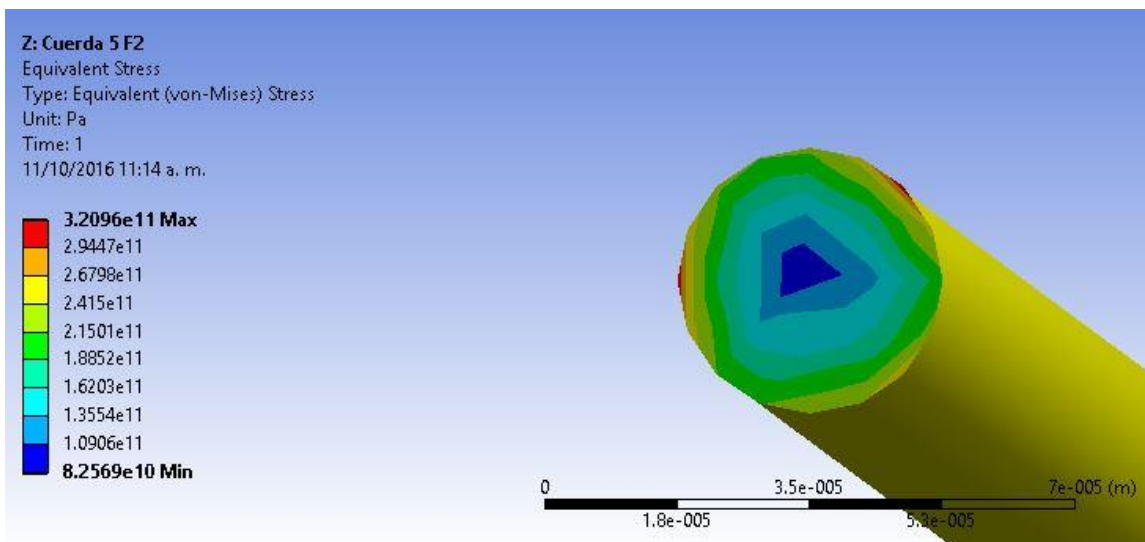
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de esfuerzos



Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de deformación

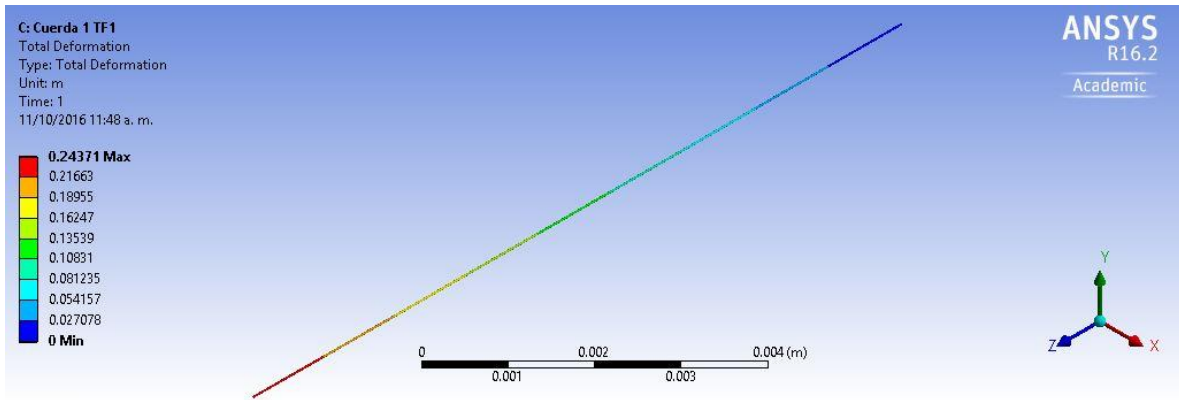


Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de esfuerzos

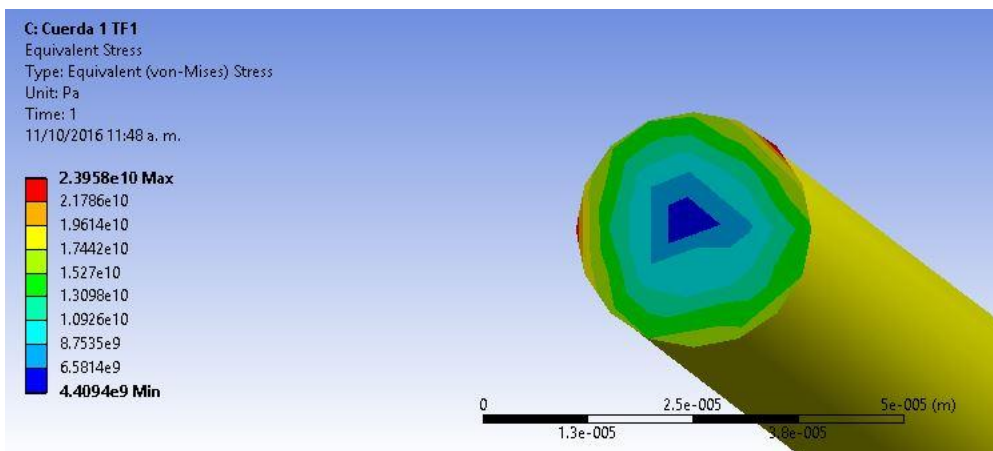


Anexo 4. Imágenes de resultados en ANSYS para teflón

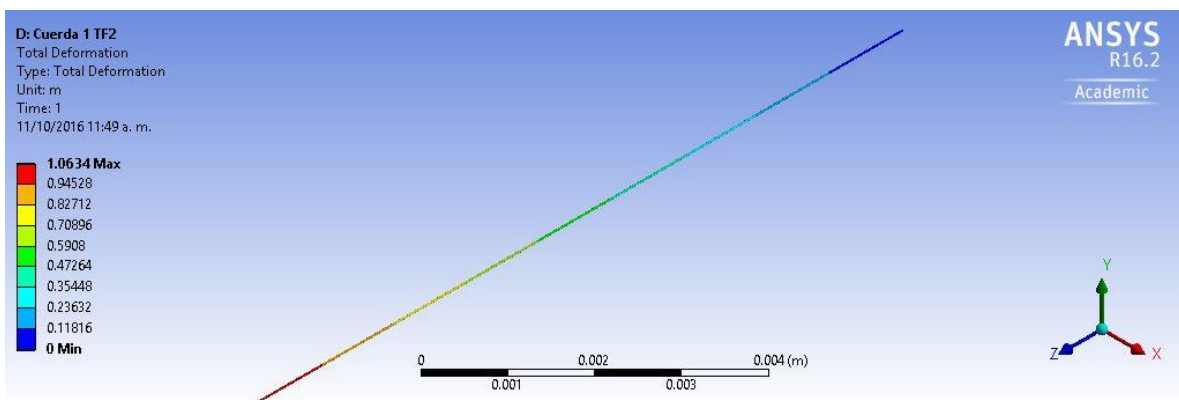
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de deformación



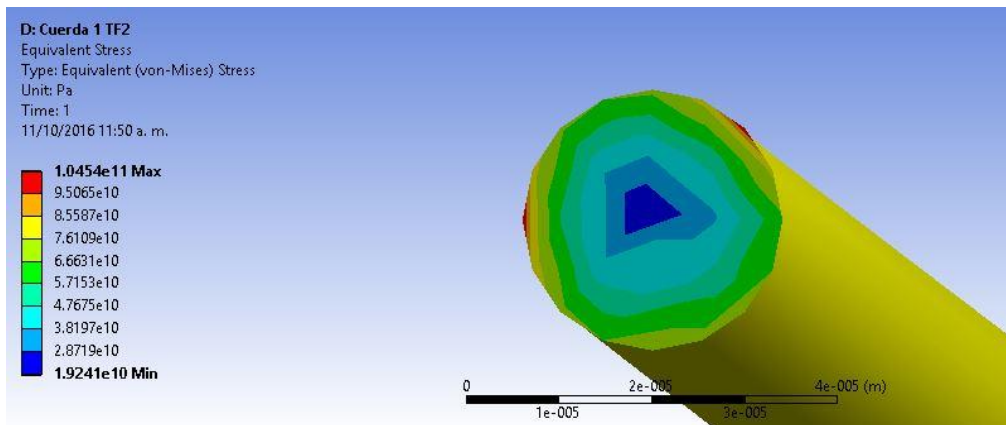
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de esfuerzos



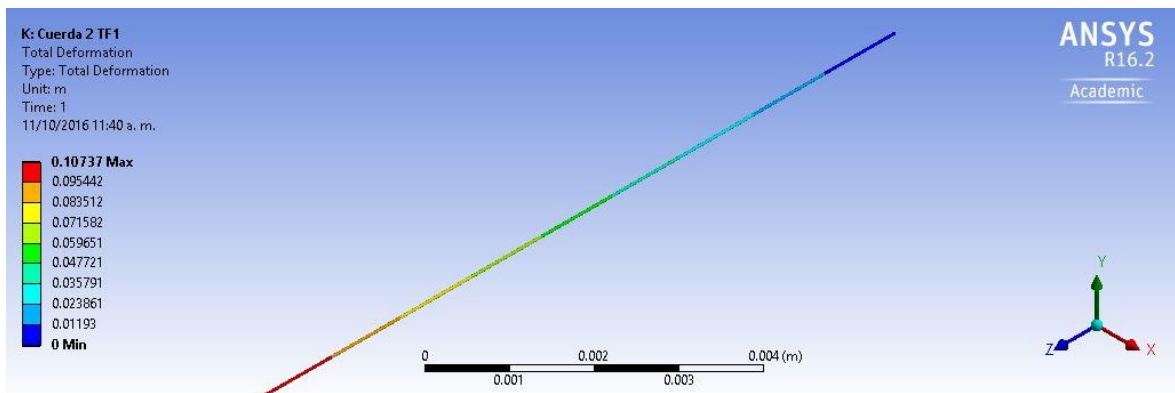
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de deformación



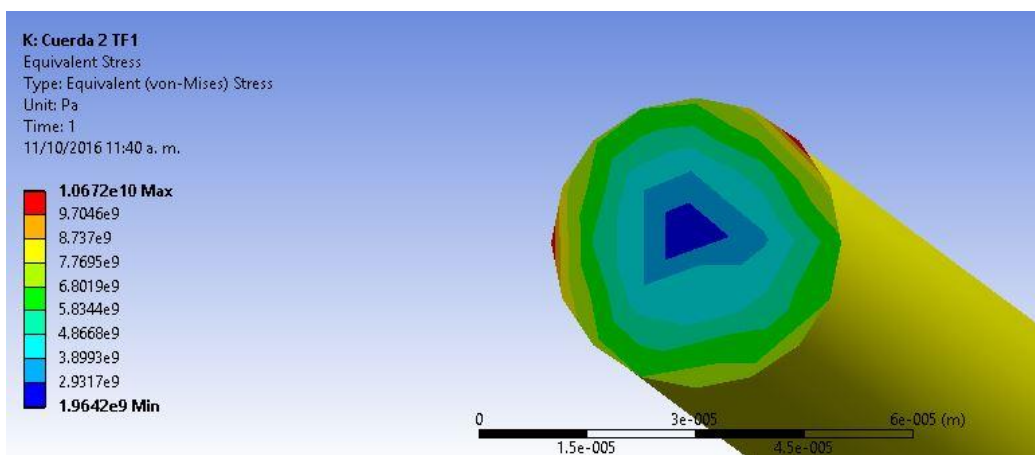
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de esfuerzos



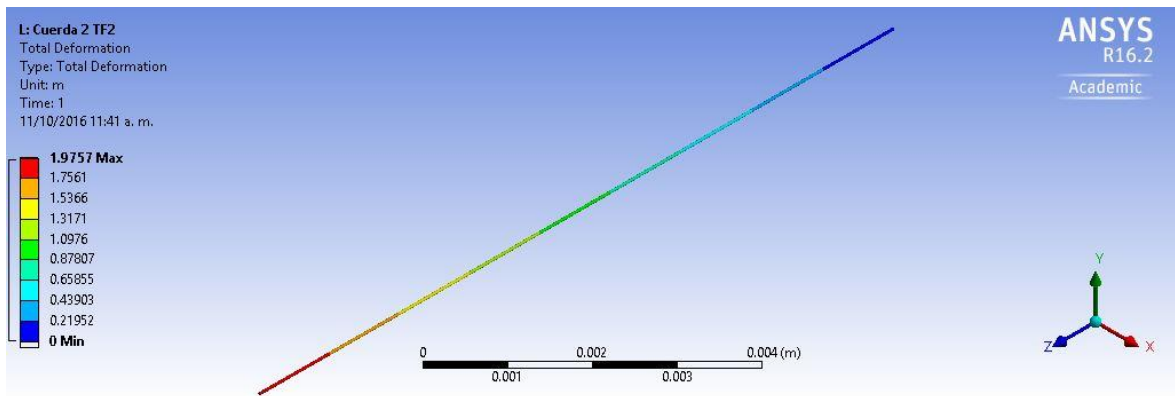
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de deformación



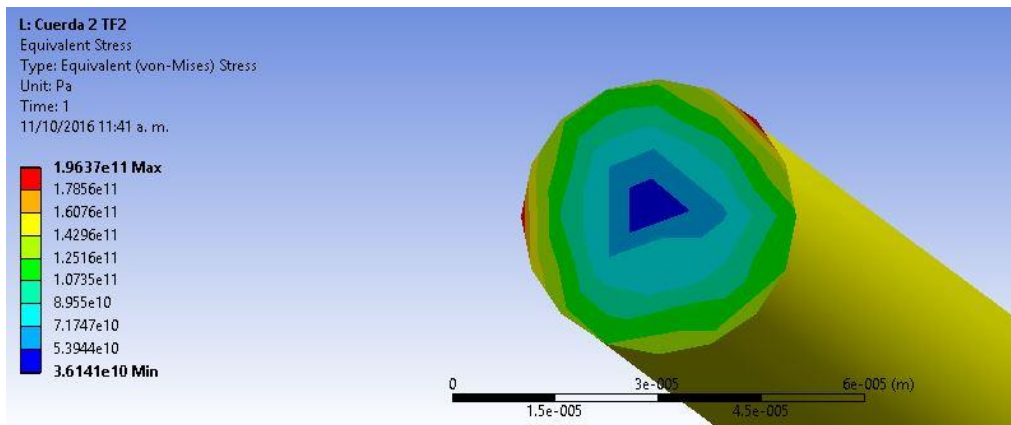
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de esfuerzos



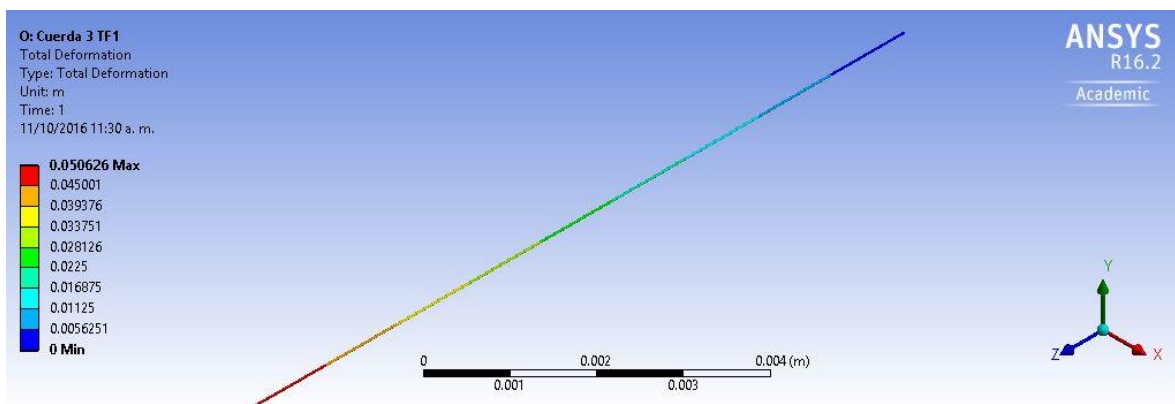
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de deformación



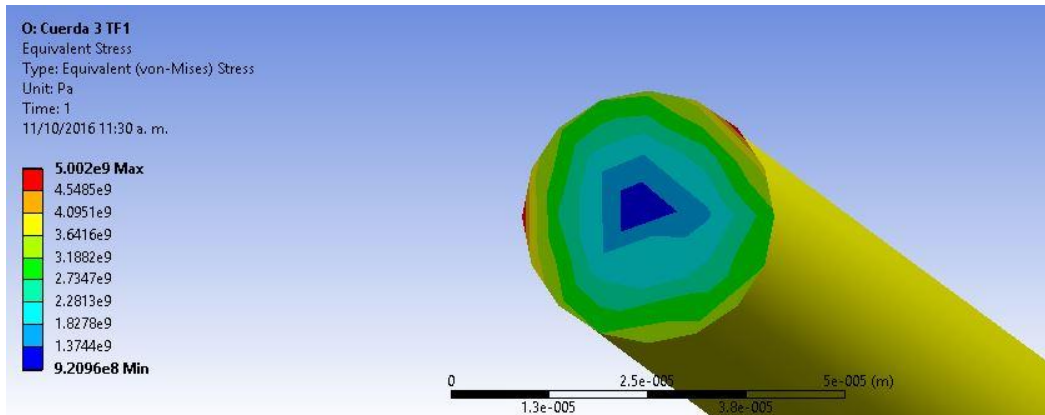
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de esfuerzos



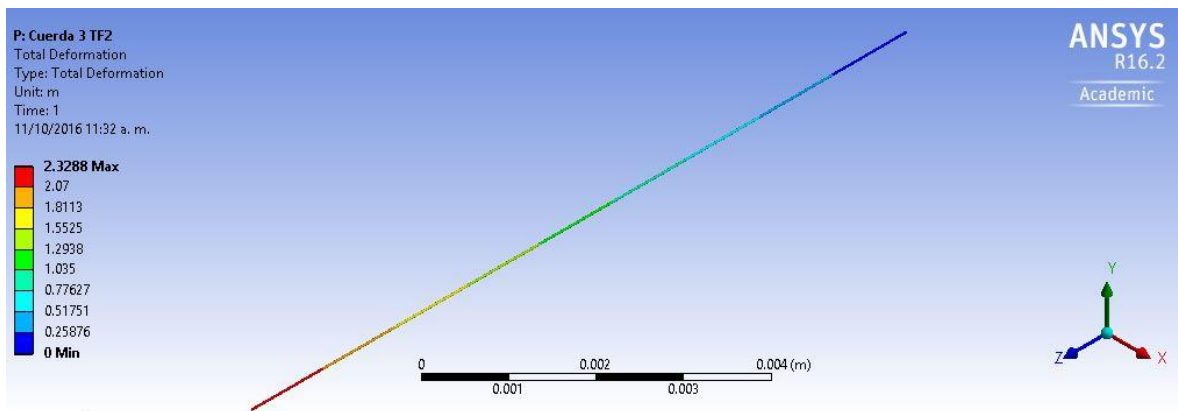
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de deformación



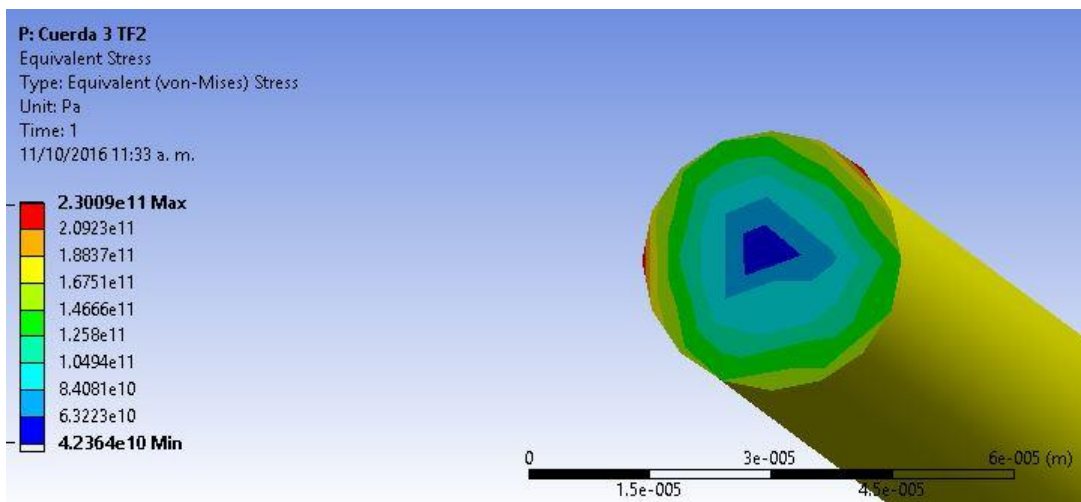
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de esfuerzos



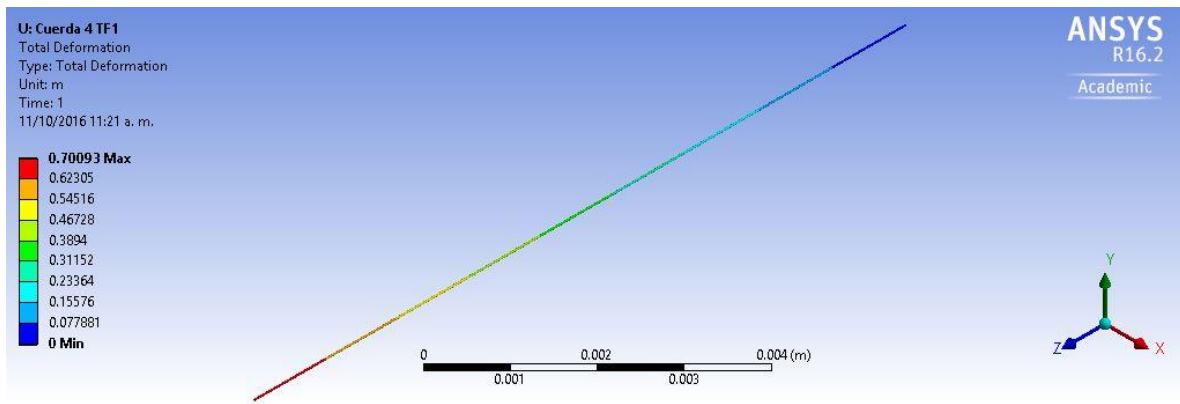
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de deformación



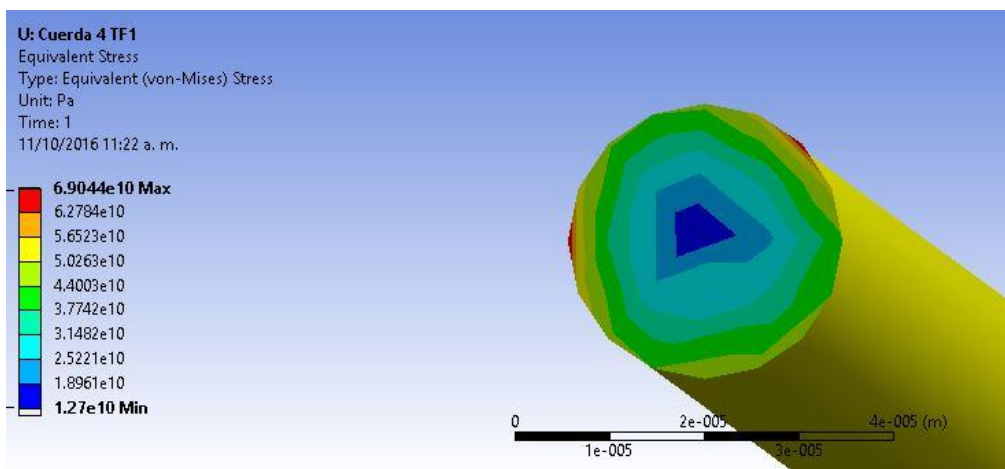
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de esfuerzos



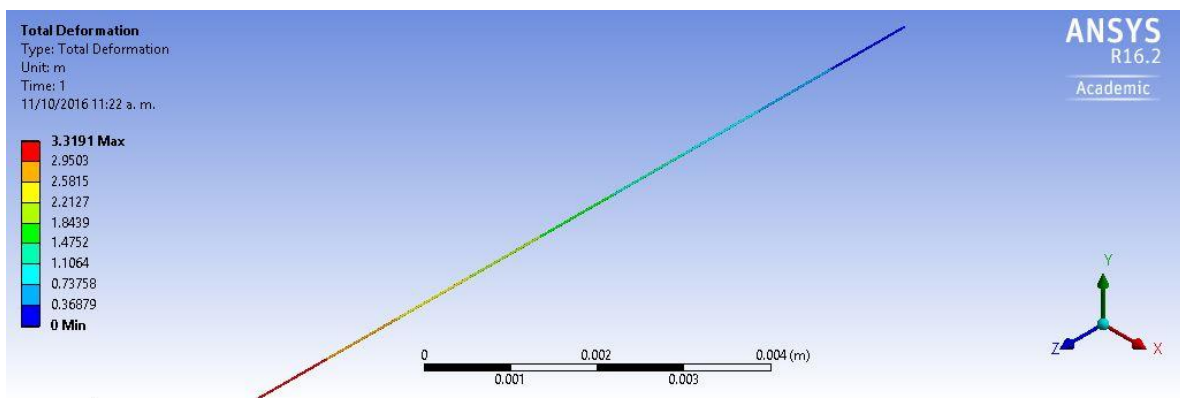
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de deformación



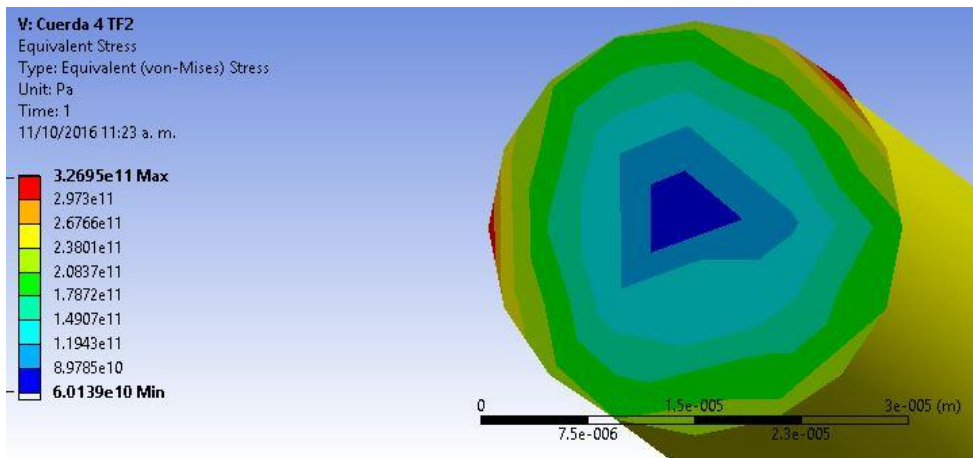
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de esfuerzos



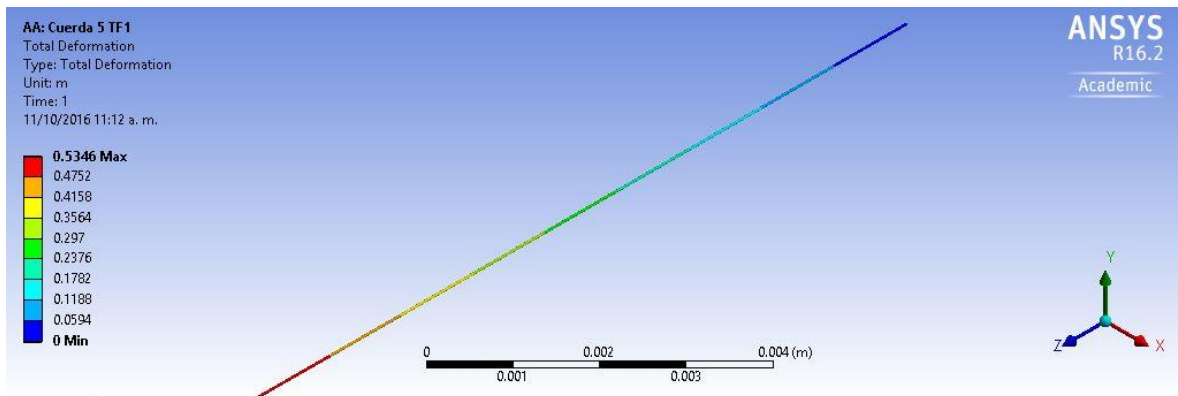
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de deformación



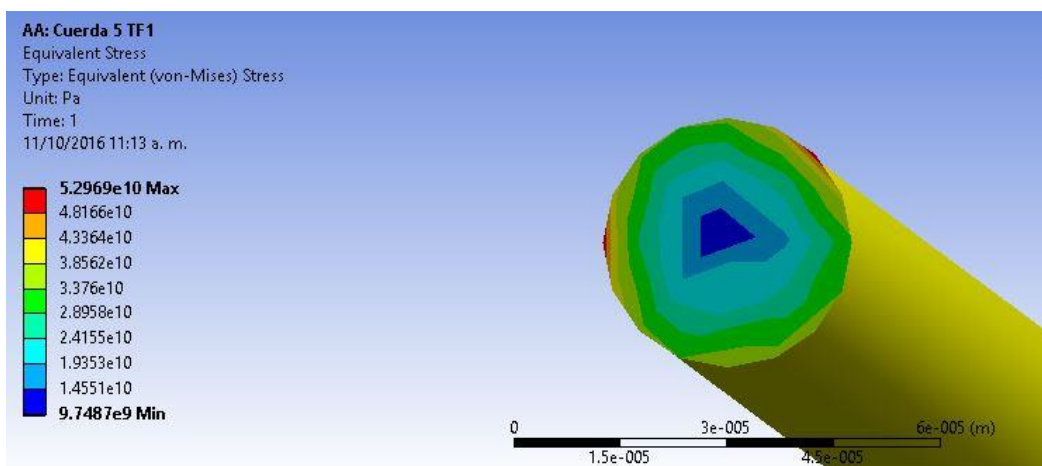
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de esfuerzos



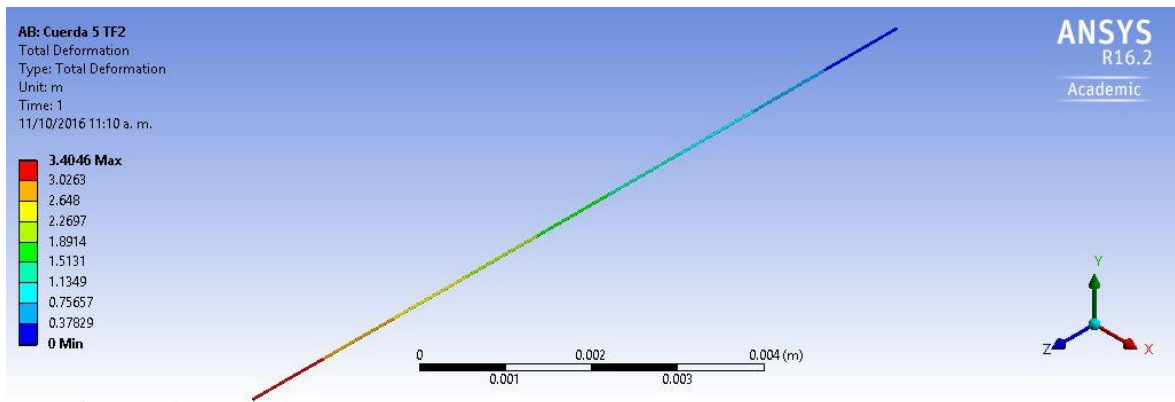
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de deformación



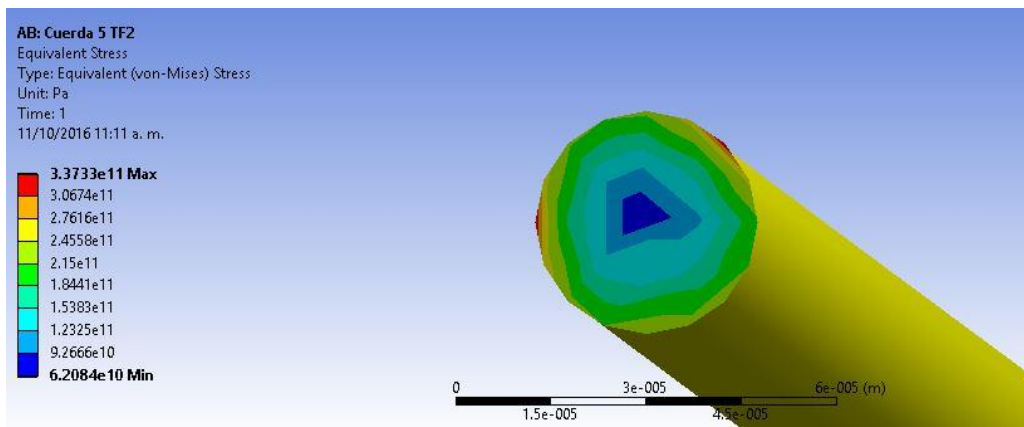
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de esfuerzos



Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de deformación

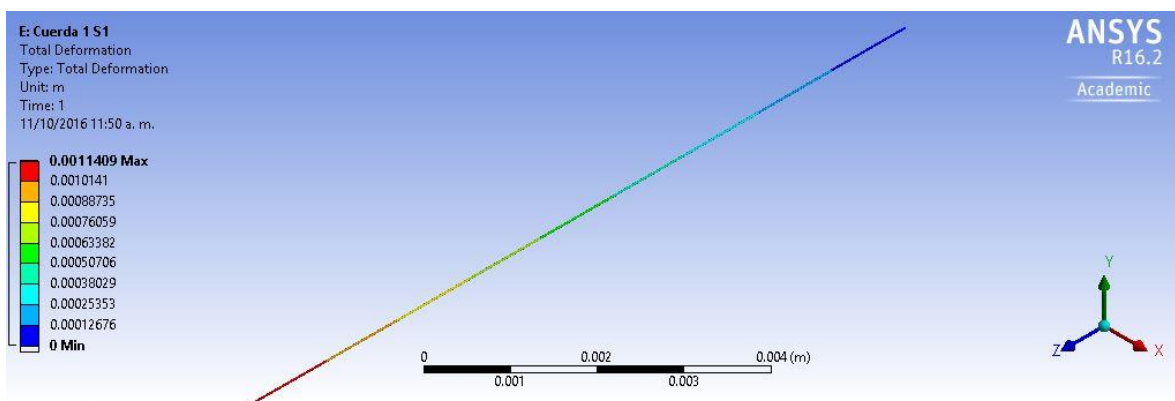


Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de esfuerzos

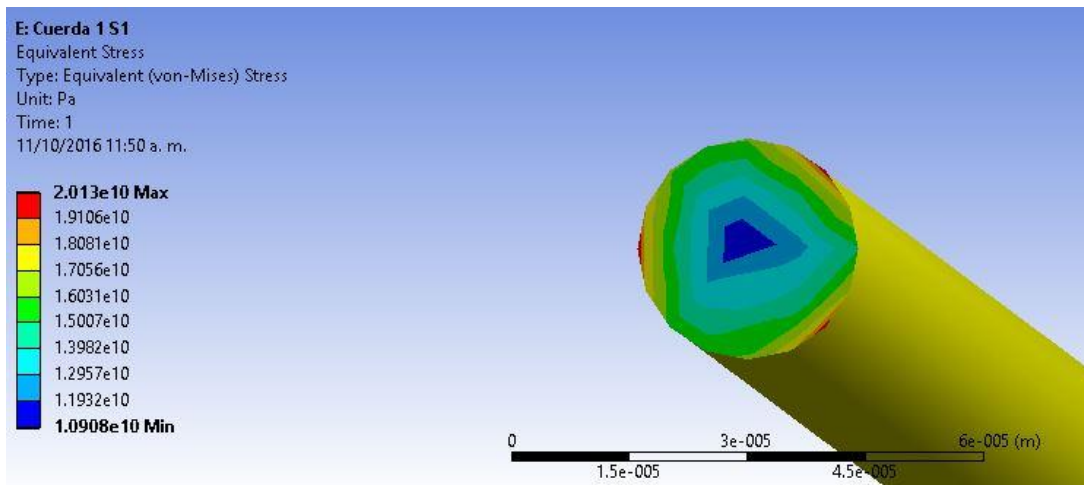


Anexo 5. Imágenes de resultados en ANSYS para silicón

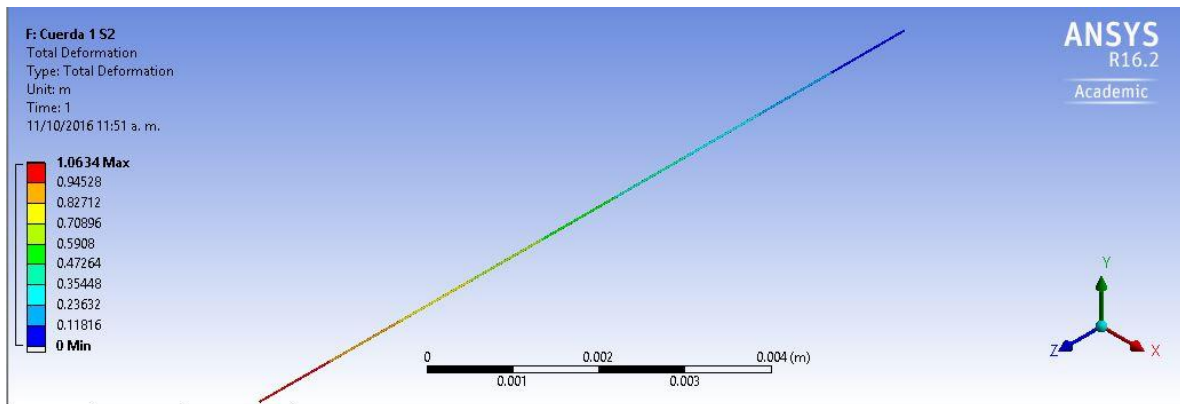
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de deformación



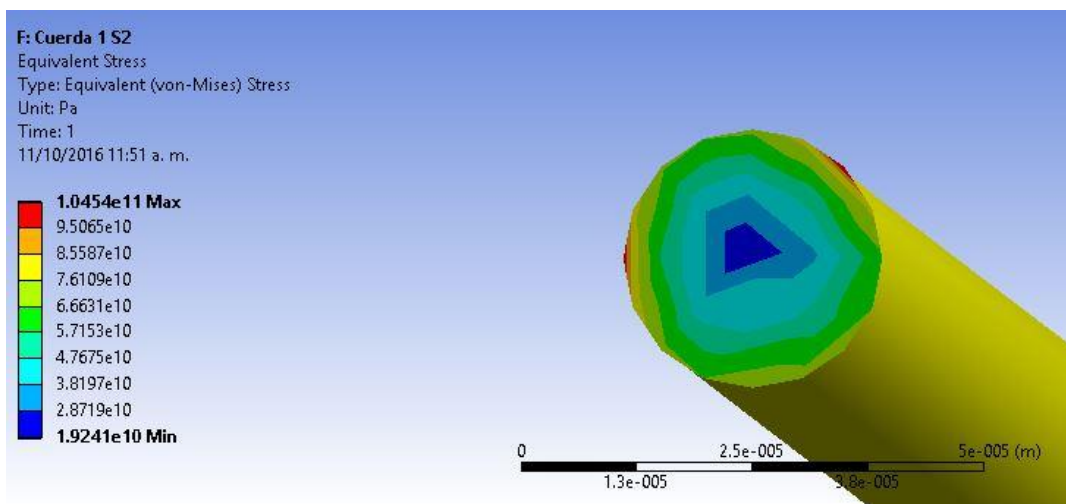
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 1 Simulación de esfuerzos



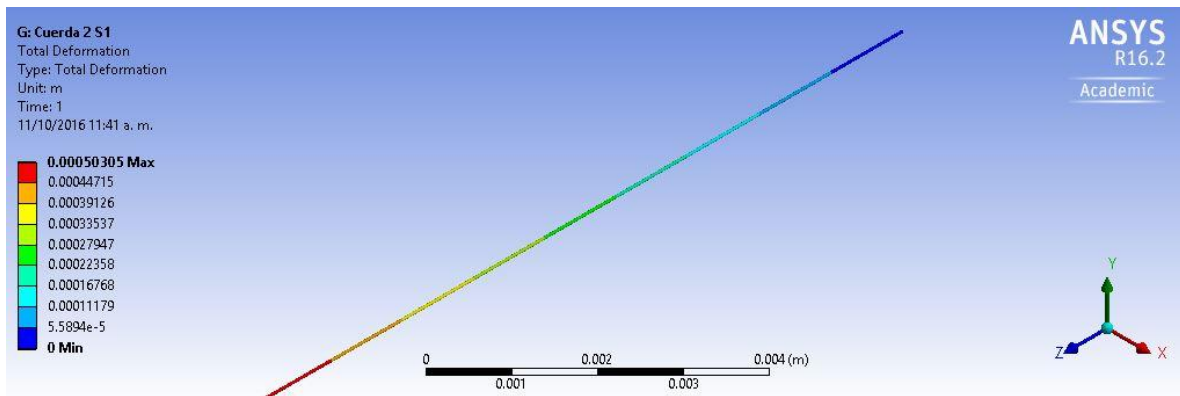
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de deformación



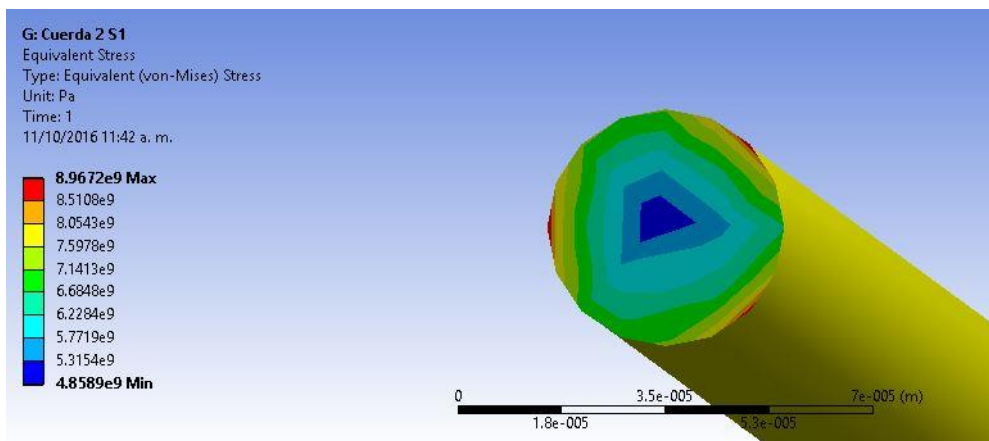
Cuerda 1 (Vocal A) Formante 2 Simulación de esfuerzos



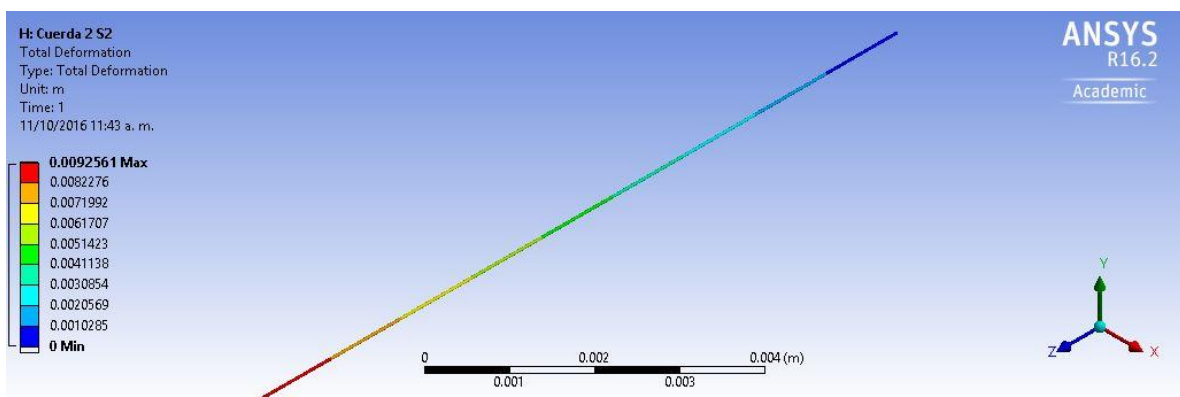
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de deformación



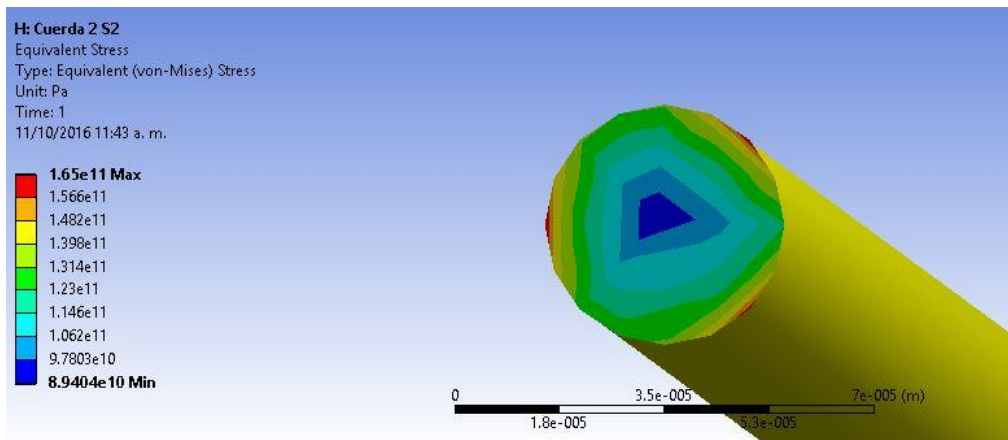
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 1 Simulación de esfuerzos



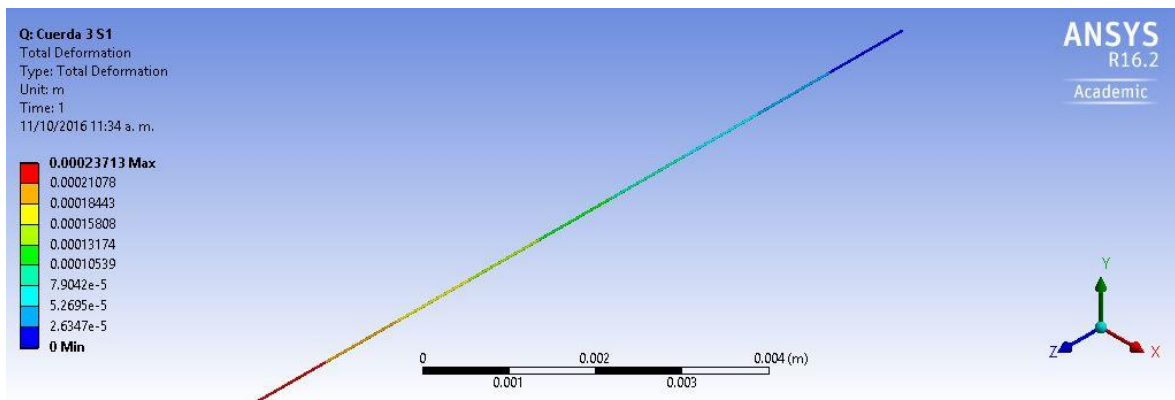
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de deformación



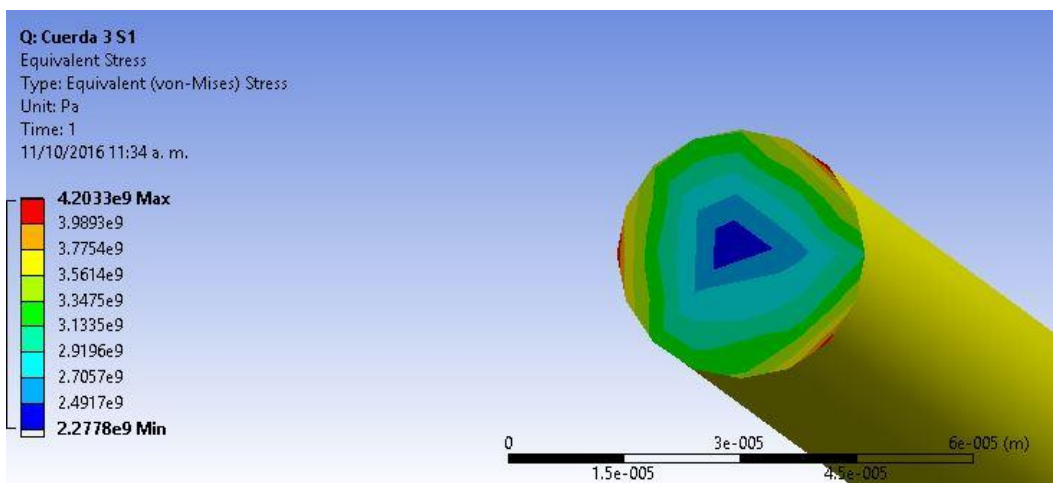
Cuerda 2 (Vocal E) Formante 2 Simulación de esfuerzos



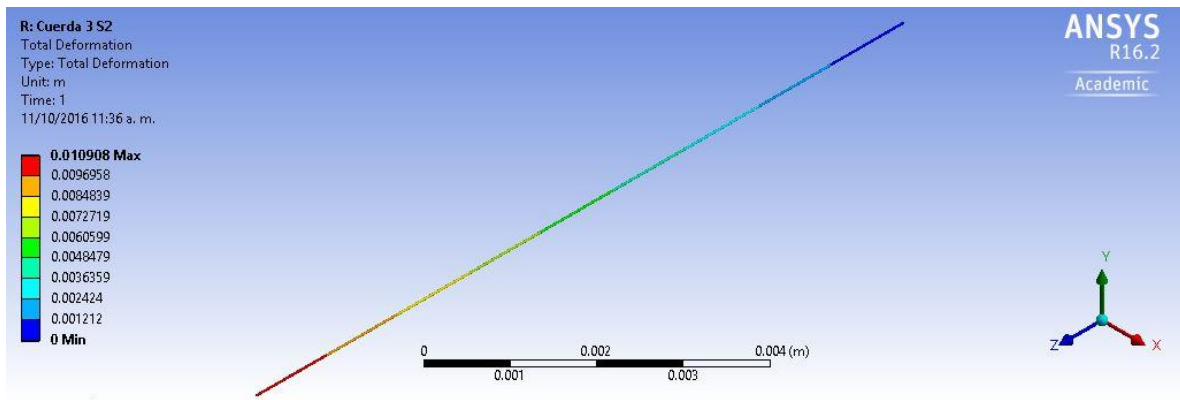
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de deformación



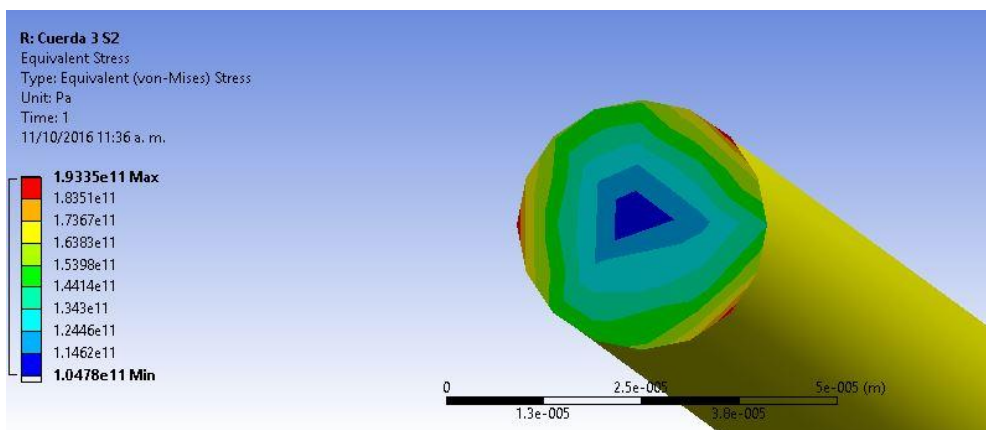
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 1 Simulación de esfuerzos



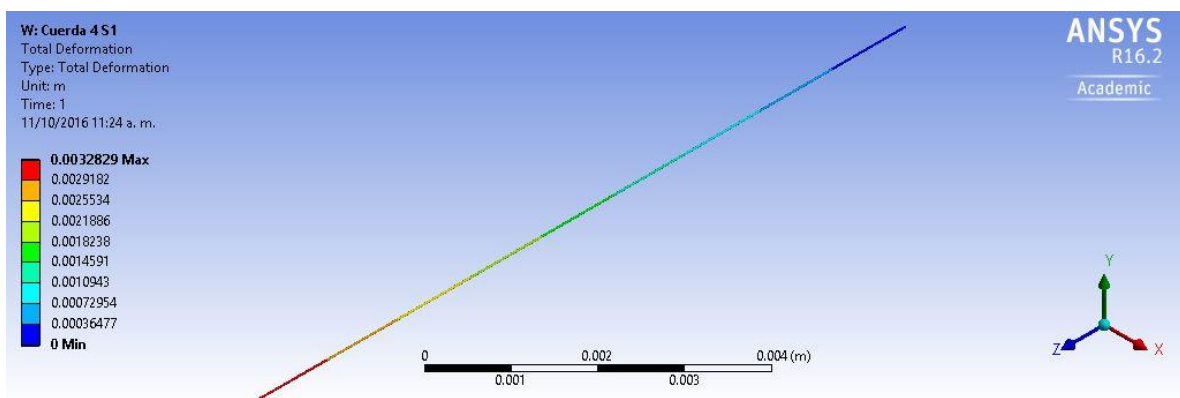
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de deformación



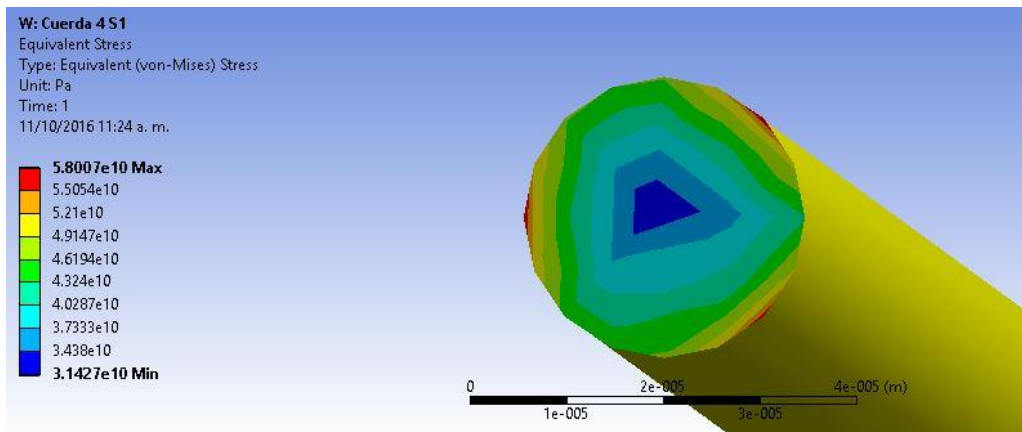
Cuerda 3 (Vocal I) Formante 2 Simulación de esfuerzos



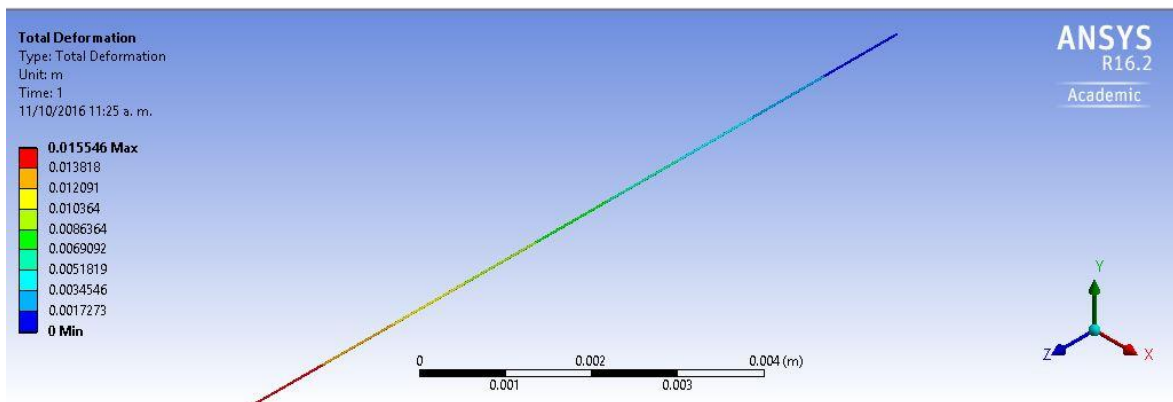
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de deformación



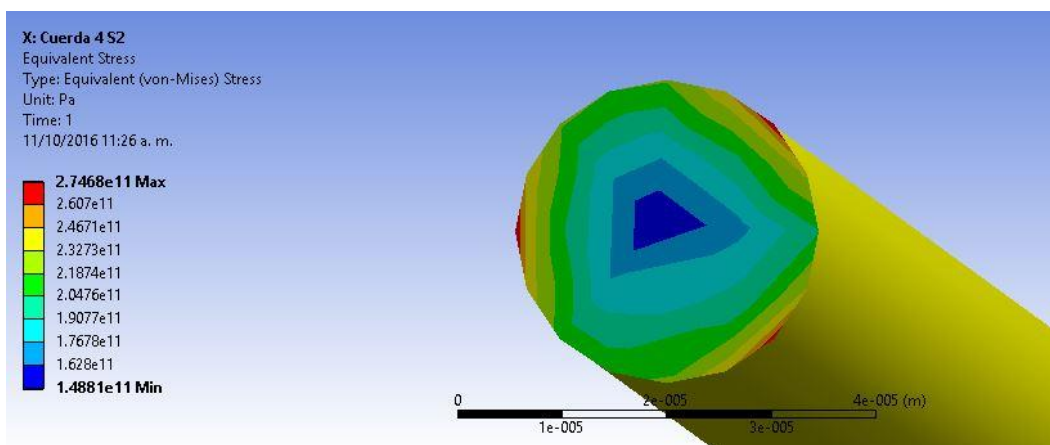
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 1 Simulación de esfuerzos



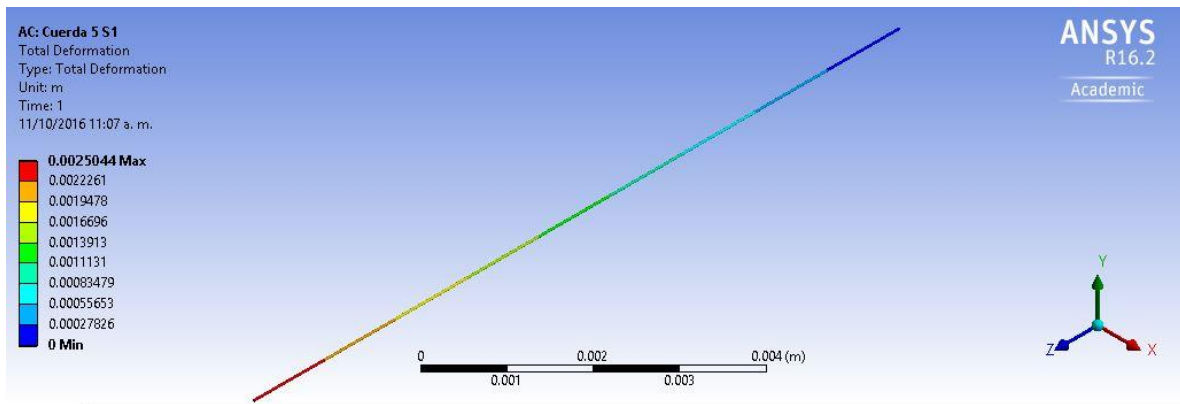
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de deformación



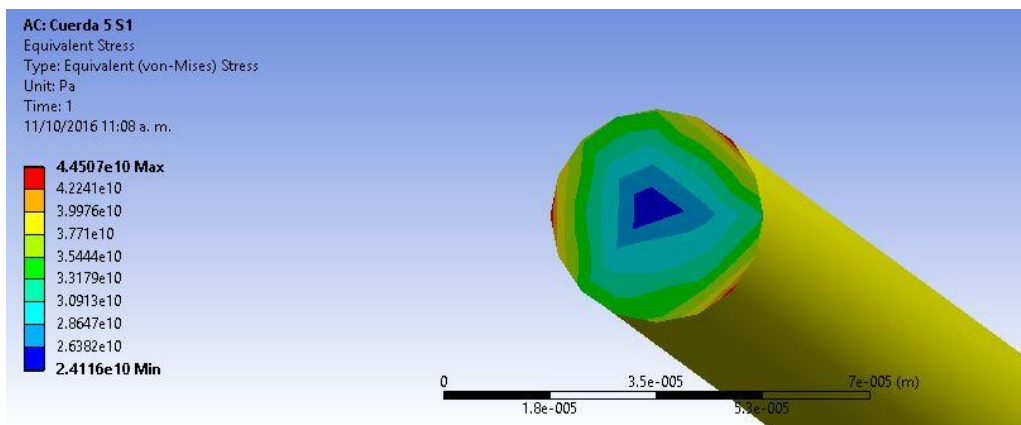
Cuerda 4 (Vocal O) Formante 2 Simulación de esfuerzos



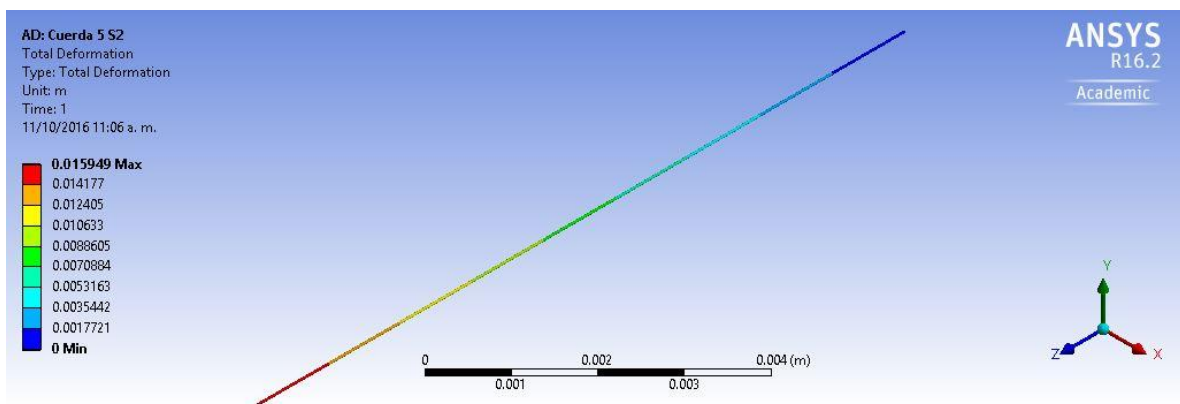
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de deformación



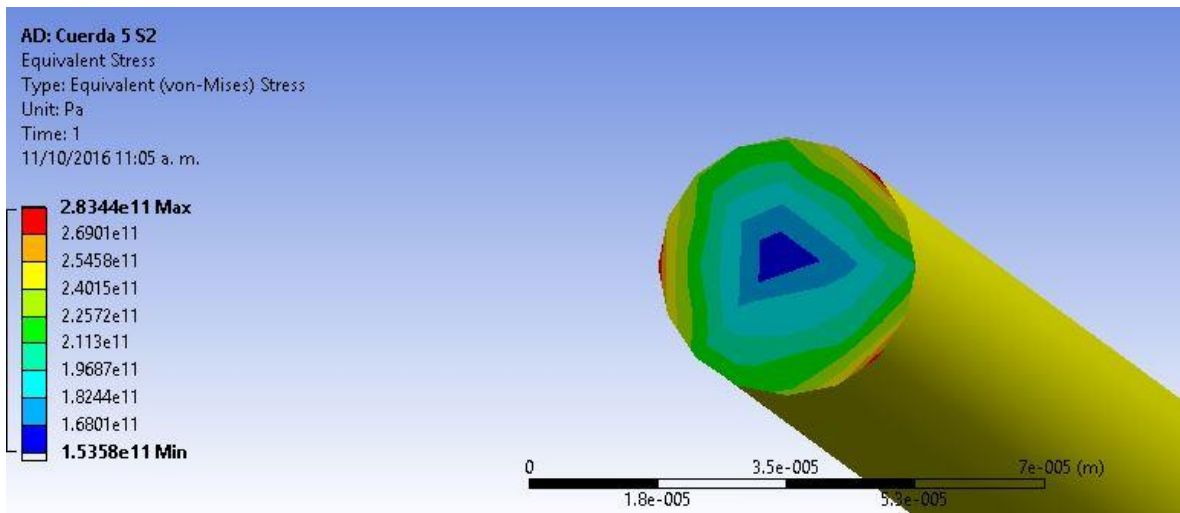
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 1 Simulación de esfuerzos



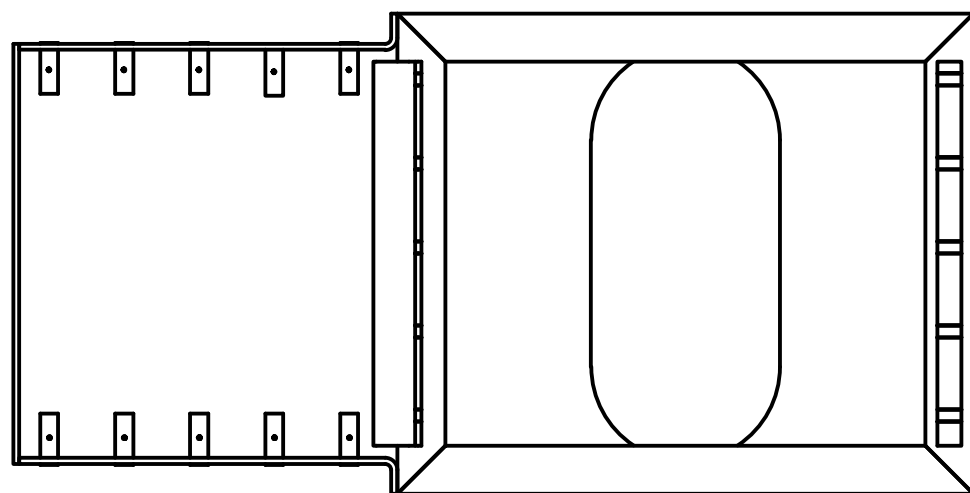
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de deformación



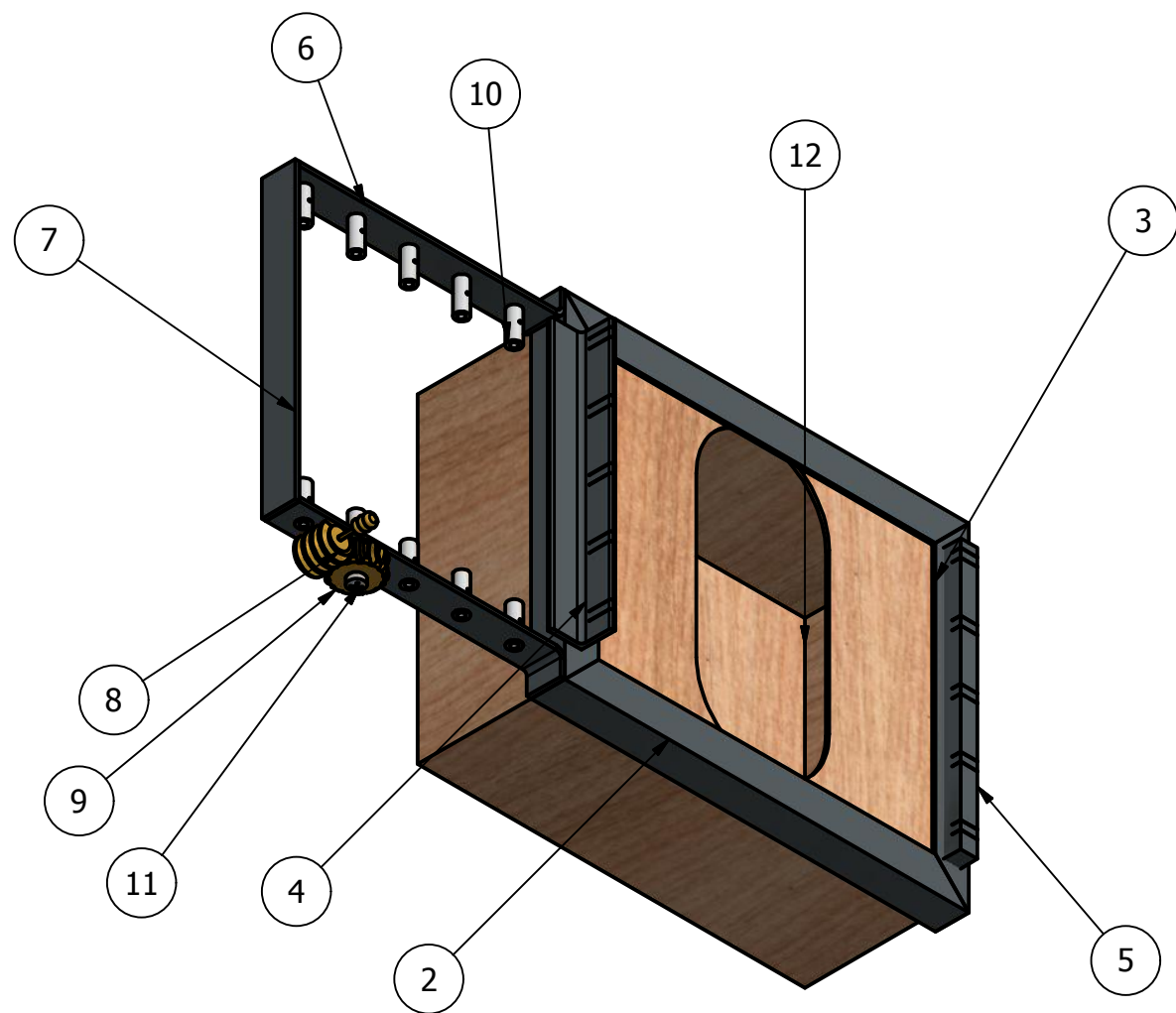
Cuerda 5 (Vocal U) Formante 2 Simulación de esfuerzos


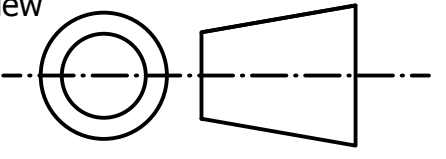


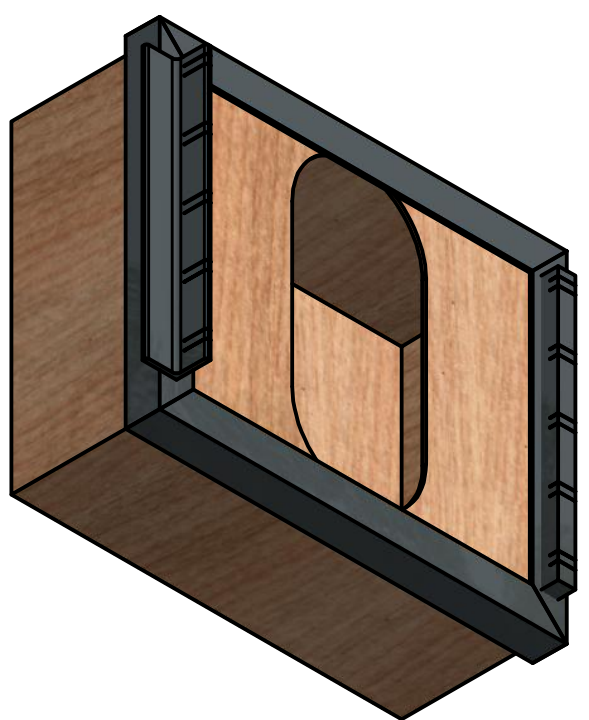
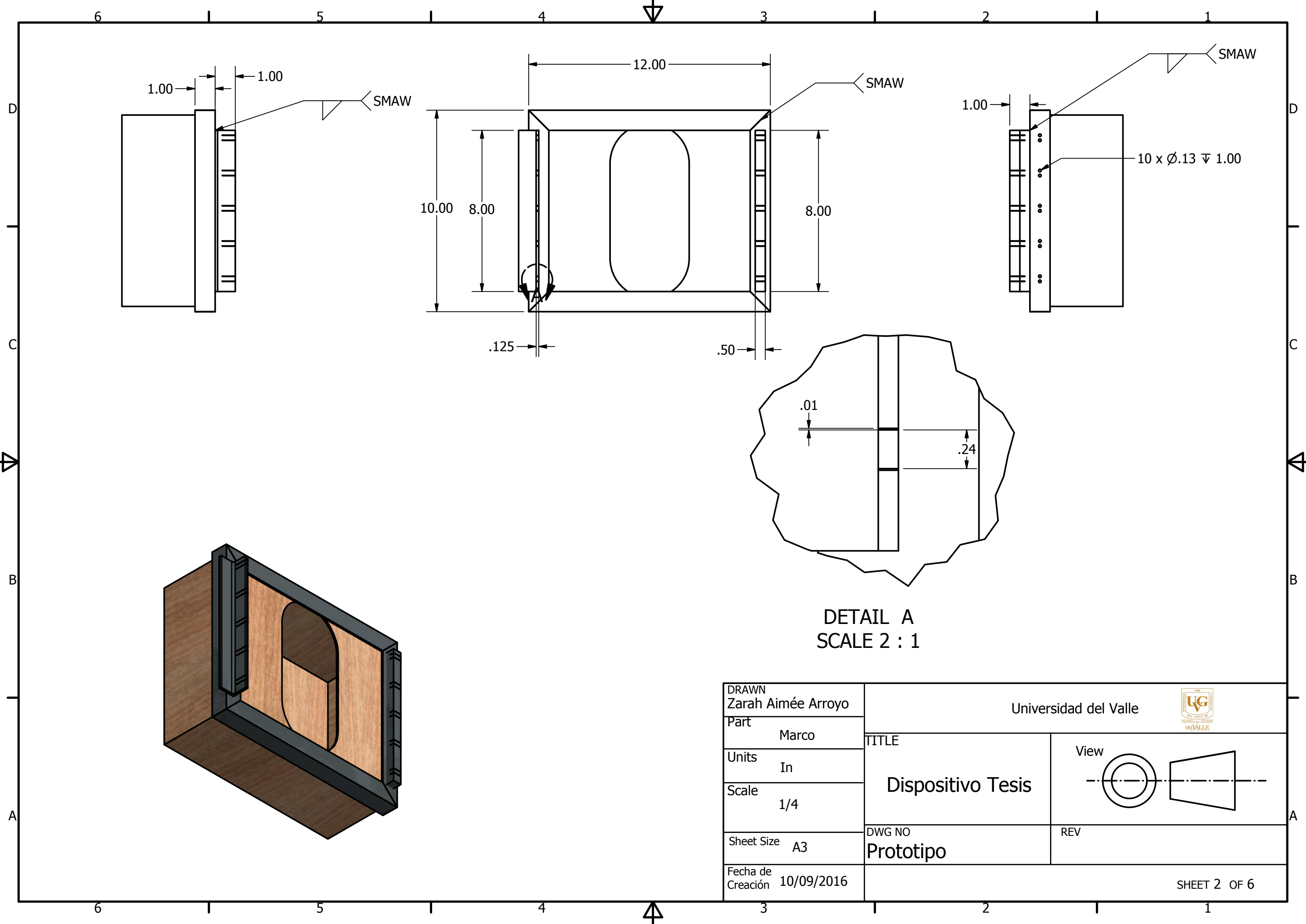
Anexo 6. Planos prototipo




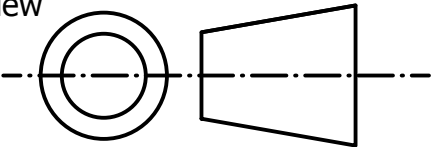
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL
1	1	Marco	Generic
2	24 in	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 12	Iron
3	20 in	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 10	Iron
4	8 in	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 8	Iron
5	8 in	AISC - 1x1/2 - 8	Iron
6	2	Porta clavijas	Iron
7	1	Placa	Iron
8	10	Worm	Brass
9	10	Worm Gear	Brass
10	10	tubo	ABS Plastic
11	10	ANSI B18.6.3 - 1/4 - 20 - 3/8	Steel
12	1	Resonador	Wood



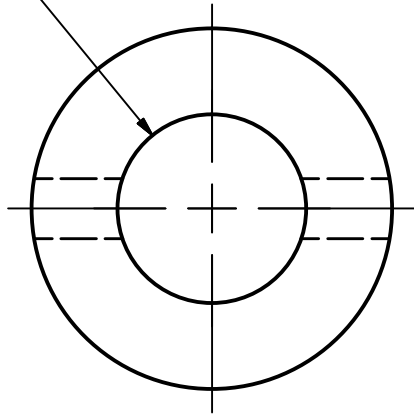
DRAWN Zarah Aimée Arroyo		Universidad del Valle			
Part	Prototipo	TITLE		View	
Units	In	Dispositivo Tesis			
Scale	1/2				
Sheet Size	A3	DWG NO	REV		
Fecha de Creación	10/09/2016	Prototipo		SHEET 1 OF 6	



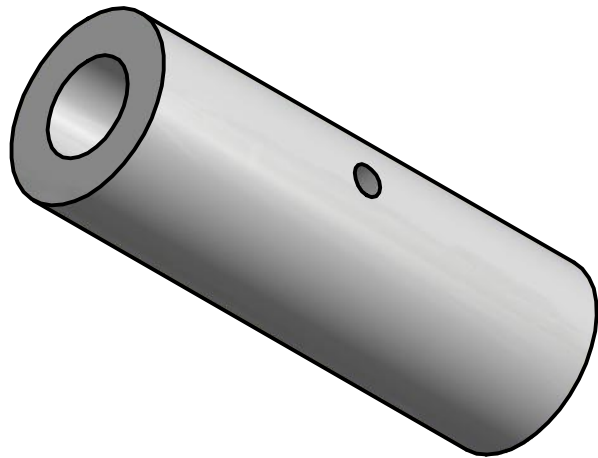
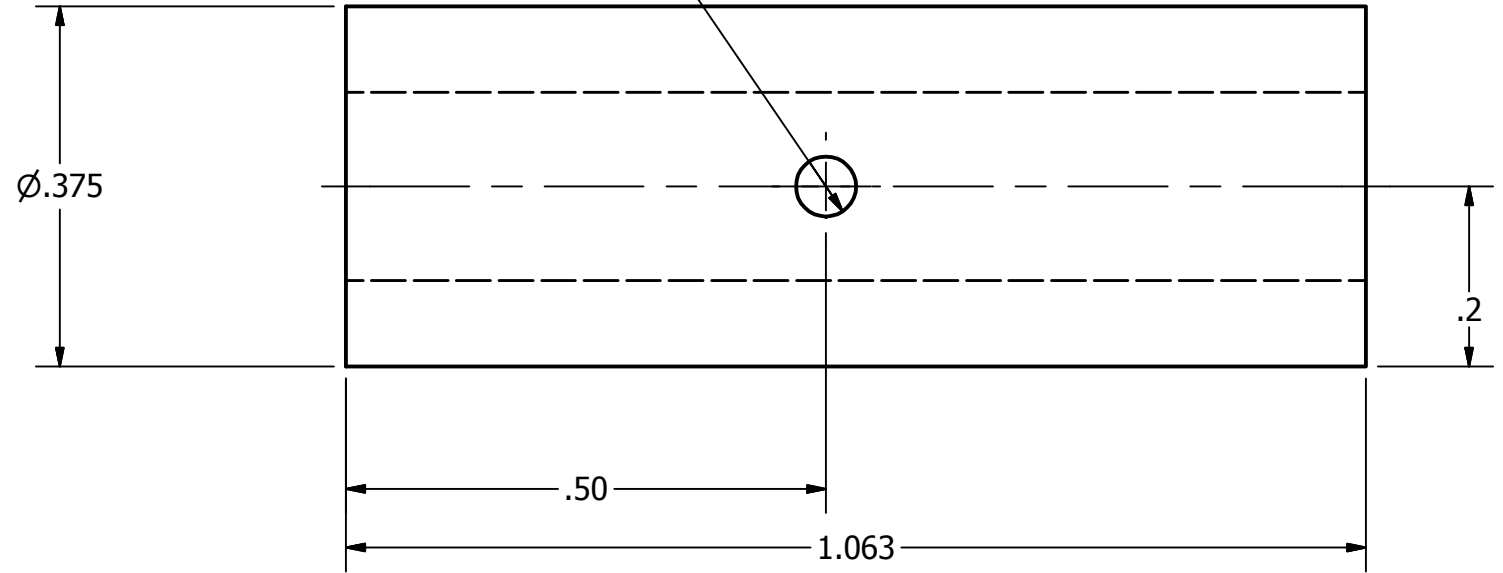
DETAIL A
SCALE 2 : 1

DRAWN Zarah Aimée Arroyo	Universidad del Valle 	
Part Marco	TITLE Dispositivo Tesis	View 
Units In	DWG NO Prototipo	REV
Scale 1/4		
Sheet Size A3		
Fecha de Creación 10/09/2016	SHEET 2 OF 6	

Ø.196



Ø.06 THRU



DRAWN	Zarah Aimée Arroyo
Part	Clavijas
Units	In
Scale	5 : 1
Sheet Size	A3
Fecha de Creación	24/09/2016

Universidad del Valle



TITLE

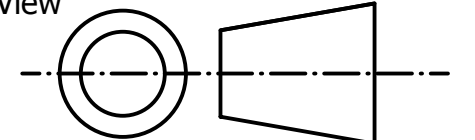
Dispositivo Tesis

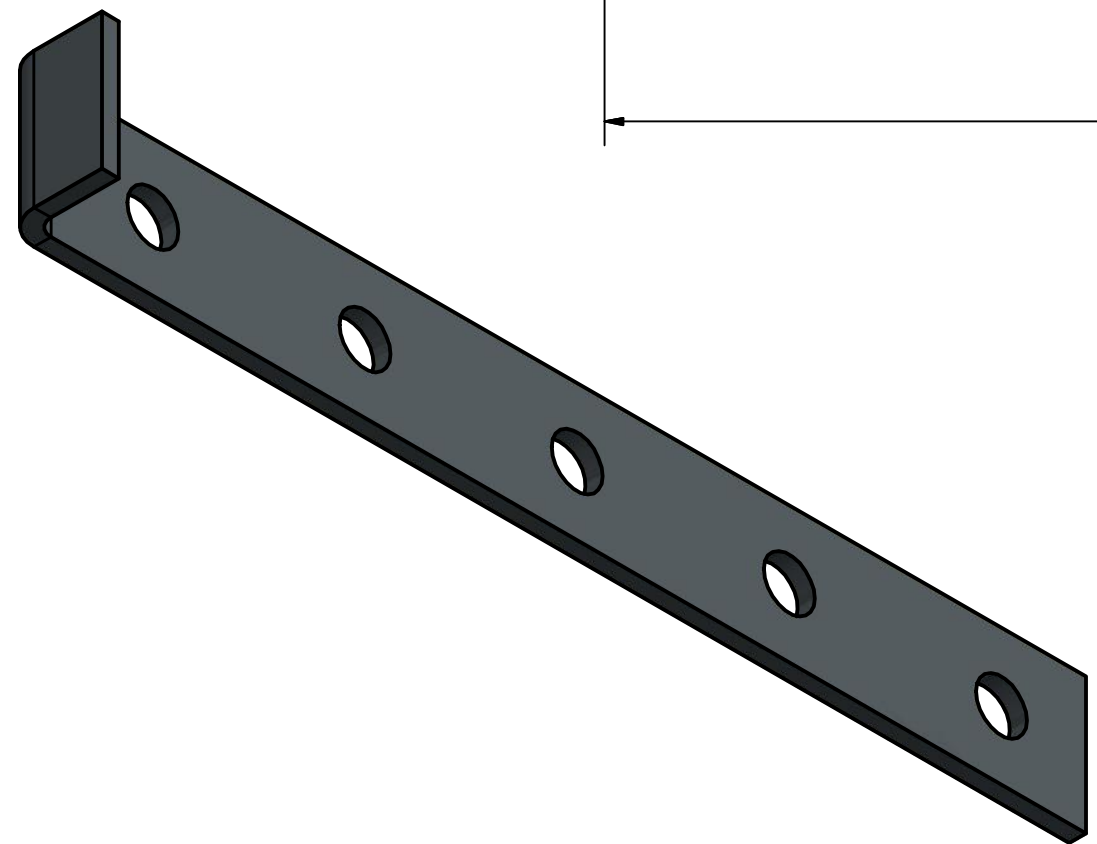
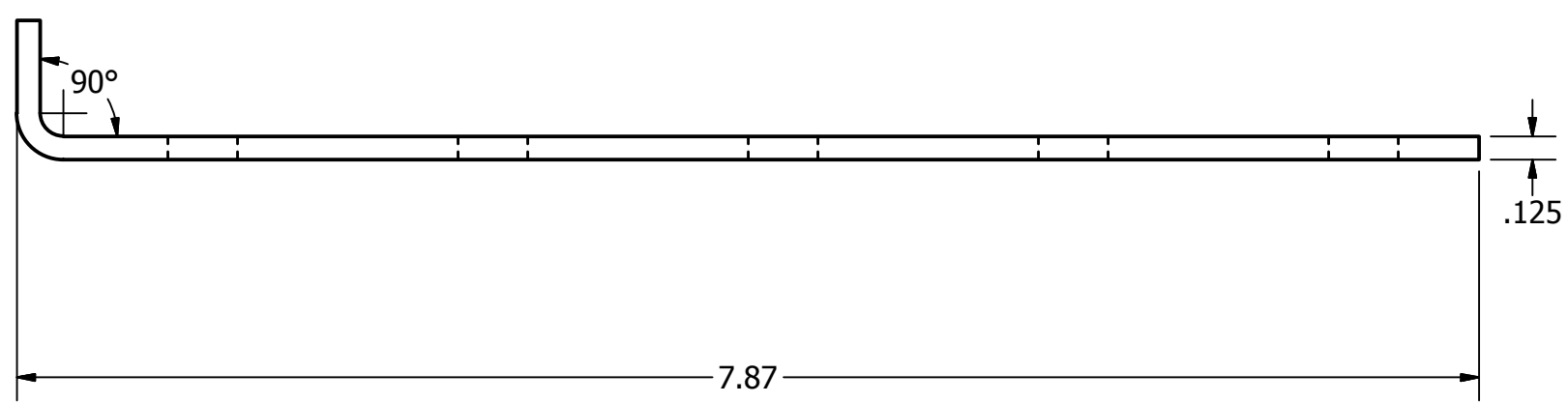
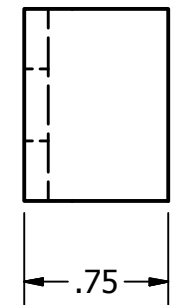
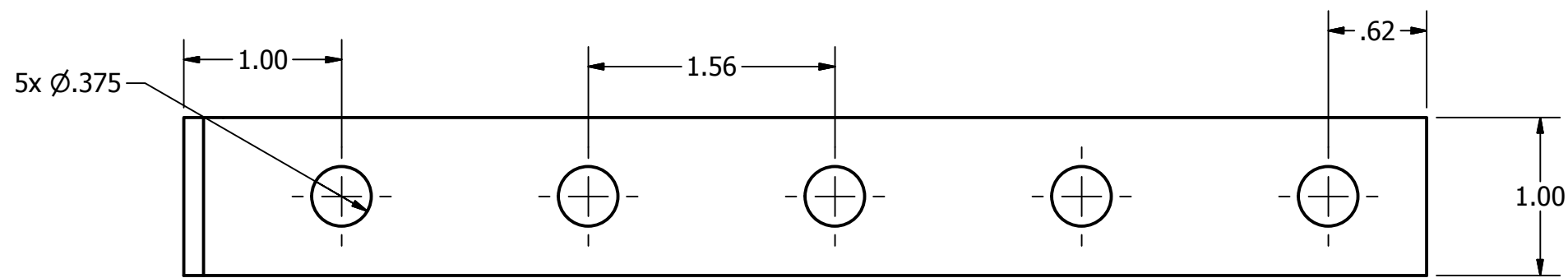
DWG NO

Prototipo


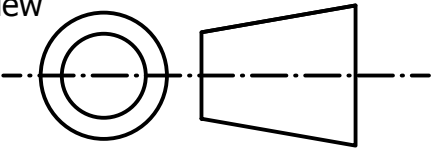
REV

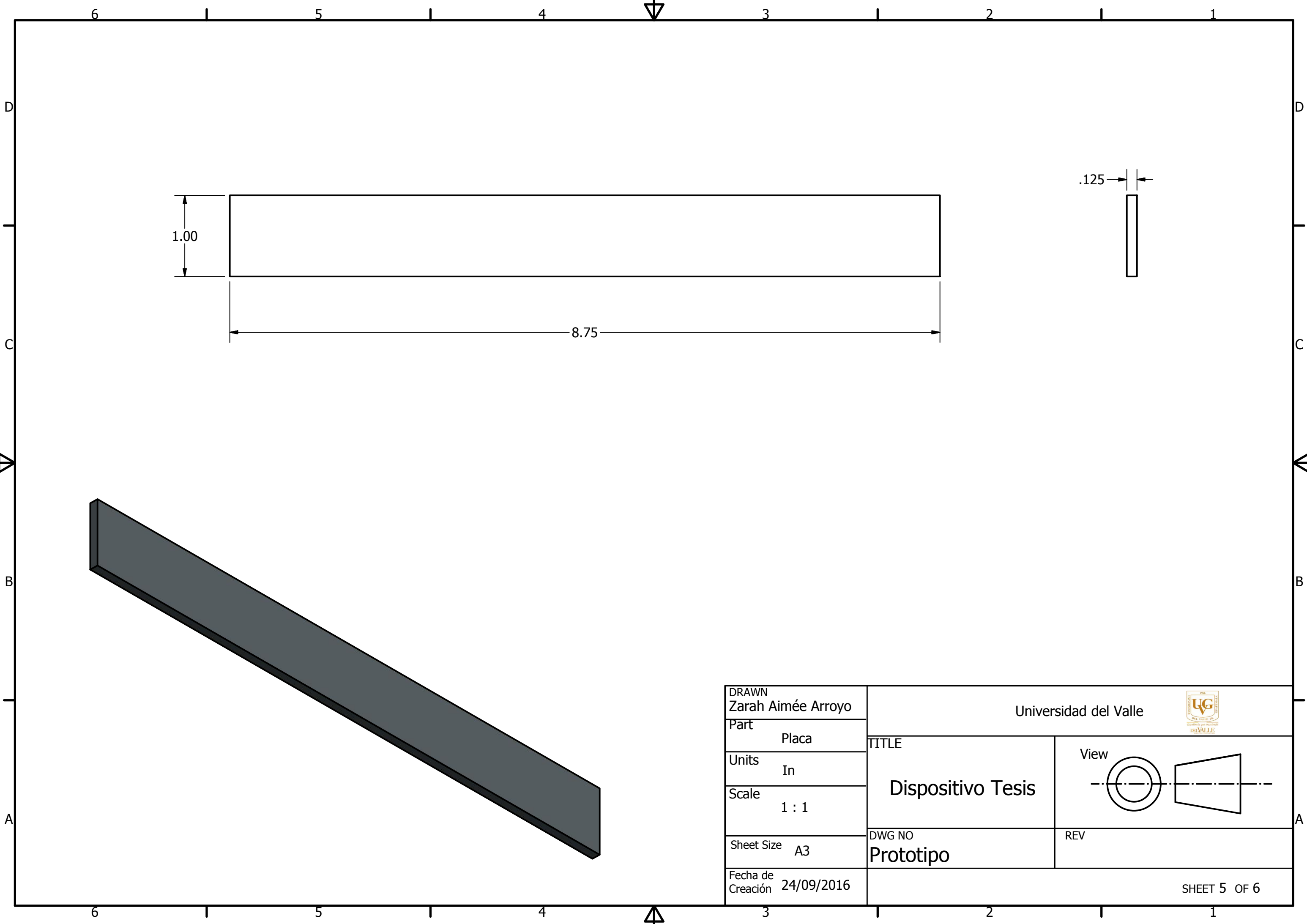
View




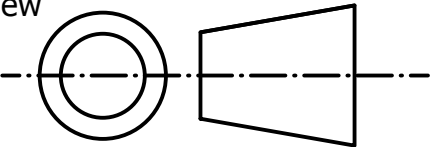


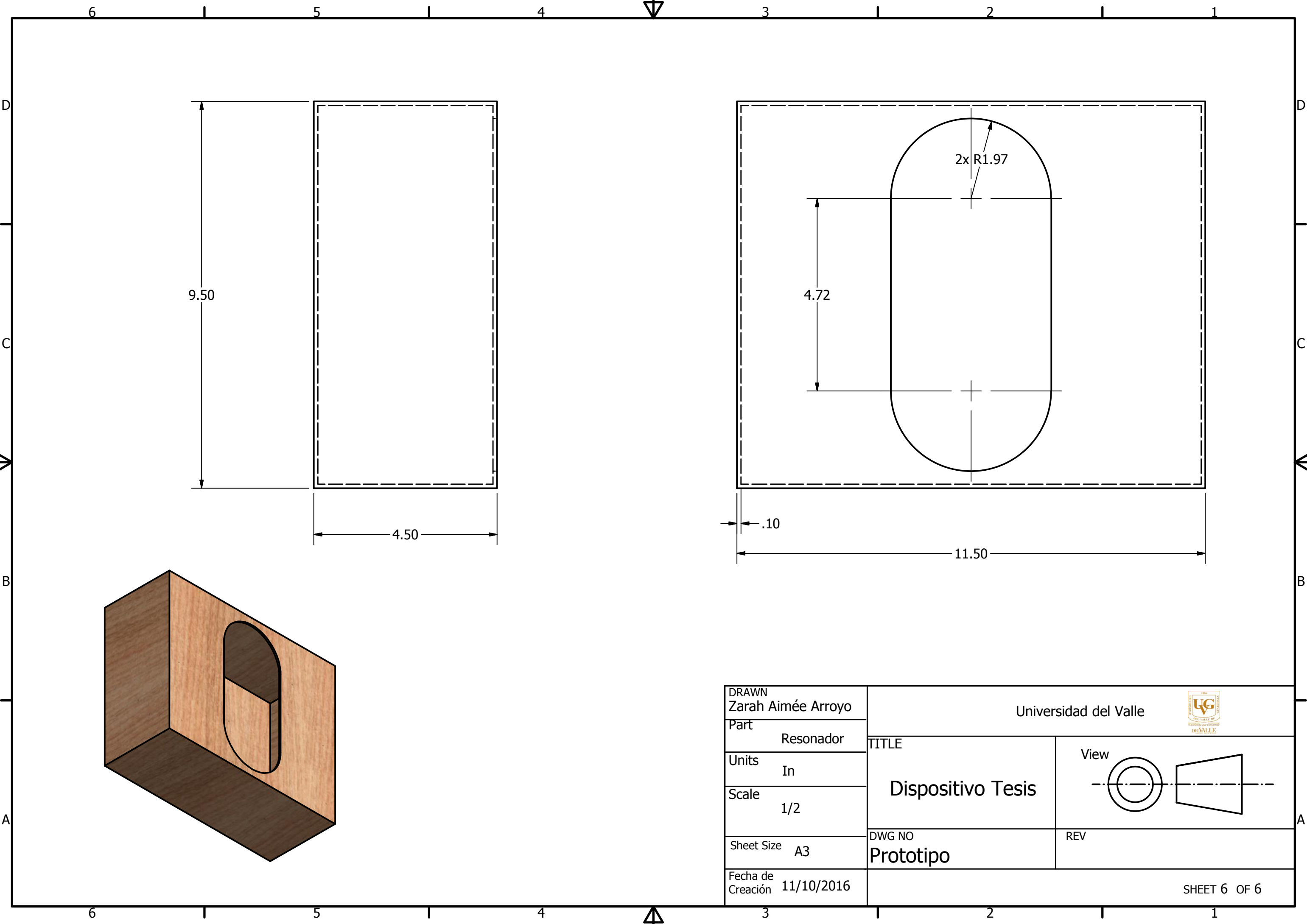
DRAWN	Zarah Aimée Arroyo
Part	PortaClavijas
Units	In
Scale	1 : 1
Sheet Size	A3
Fecha de Creación	24/09/2016

Universidad del Valle 	
TITLE	
Dispositivo Tesis	
DWG NO	REV
Prototipo	
SHEET 4 OF 6	


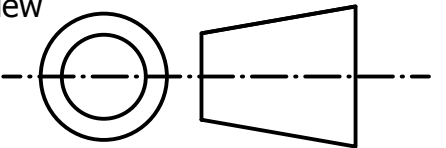


DRAWN	Zarah Aimée Arroyo
Part	Placa
Units	In
Scale	1 : 1
Sheet Size	A3
Fecha de Creación	24/09/2016

Universidad del Valle 	
TITLE Dispositivo Tesis	View 
DWG NO Prototipo	REV
SHEET 5 OF 6	



DRAWN	Zarah Aimée Arroyo
Part	Resonador
Units	In
Scale	1/2
Sheet Size	A3
Fecha de Creación	11/10/2016

Universidad del Valle 	
TITLE Dispositivo Tesis	View 
DWG NO Prototipo	REV
SHEET 6 OF 6	

I. GLOSARIO

1. Hipoacusia: disminución de la agudeza auditiva.
2. Costo-diafragmática: tipo de respiración donde se utiliza la base de las costillas con los movimientos de la columna vertebral. Las costillas se mueven hacia los costados, los músculos abdominales hacia fuera y el diafragma desciende.
3. Tiroaritenideo: músculos que van desde el cartílago aritenoides hasta la parte interna del cartílago tiroides.
4. Aritenoides: dicho de un cartílago: Que es uno de los dos situados en la parte posterior de la laringe y que se articula por su base con el cartílago cricoides.
5. Cricotiroideos: músculo de la laringe ligados al cartílago cricoides y al cartílago tiroides, responsables del estiramiento de los pliegues vocales.
6. Glótica: Pertenece al orificio o abertura anterior de la laringe.
7. Fonatoria: proveniente de fonador; que interviene en la emisión de la voz o de la palabra.
8. Mecano-receptores: es el receptor sensorial que reacciona ante la presión mecánica o las distorsiones.