

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS

Departamento de Física



**Estudio de la influencia del tipo de material y de fluidos intersticiales
en la propagación de ondas solitarias en materia granular 1d**

Resultados experimentales

Eduardo Andrés Cancino Jaque

Profesor Guía:

Raúl Santiago Labbé Morales

**Tesis para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico.**

Santiago – Chile

2018

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL Y DE
FLUIDOS INTERSTICIALES EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS
SOLITARIAS EN MATERIA GRANULAR 1D

EDUARDO ANDRÉS CANCINO JAQUE

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Raúl Labbé Morales del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato, Dr. Lautaro Vergara, Dr. Luis Gaete y Dr. Francisco Vivanco.

Dr. Lautaro Vergara

Dr. Luis Gaete

Dr. Francisco Vivanco

Dr. Enrique Cerda (Director)

Dr. Raúl Labbé (Profesor Guía)

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio experimental del tiempo de vuelo de una onda solitaria que viaja por una cadena unidimensional de esferas. Como variable de entrada se utilizó la velocidad de una esfera idéntica a las que conforman la cadena, la cual al impactar uno de los extremos de la misma genera la onda solitaria. Los resultados se obtuvieron para cadenas de esferas de distinto material y distinto largo. El estudio se repitió para cadenas con fluido intersticial en la zona de contacto entre las esferas, usando cuatro tipos distintos de aceite lubricante.

Los resultados muestran que en cada caso el tiempo de vuelo T_V en función de la velocidad de impacto V_I se ajusta a una ley de potencia de la forma $T_V(V_I) = a \cdot V_I^b$.

Se obtuvieron también resultados de tiempo de vuelo para una velocidad de impacto aproximadamente constante, para cadenas secas y con aceite. En cada caso, los tiempos de vuelo muestran fluctuaciones que no son completamente atribuibles a las fluctuaciones en la velocidad de impacto, y que pueden dar cuenta del fenómeno de fragmentación de la cadena.

Como parte del trabajo, se realizaron mejoras en el dispositivo experimental desarrollado con anterioridad para este tipo de investigaciones.

Palabras Claves: Tiempo de Vuelo, onda solitaria, cadena de esferas, fluido intersticial.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, quienes han hecho casi lo imposible para que yo pudiera tener estudios y poder optar por un título profesional.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Santiago de Chile por otorgarme la Beca Usach Puntaje Nacional en virtud de la Resolución N° 9437 del 2008 mediante el exento N° 001604, y con ésta poder estudiar y poder optar por un título profesional.

Agradezco al profesor Raúl Labbé, quién además de ser mi profesor guía de mi tesis, es la persona que me brindó ayuda frente a cualquier duda que tuviera en diversas áreas, y por lo cual considero que gran parte de mi formación se la debo a él.

Agradezco a todos los profesores que me ayudaron y guiaron en mi formación académica, en especial al profesor Leonardo Caballero, quién me introdujo en el área de la física experimental y la programación, a la profesora Yolanda Vargas quién me brindó un montón de veces su ayuda y al profesor Ernesto Gramsch quien me permitió aprender un montón de cosas en su laboratorio. Espero poder seguir contando con la ayuda de ellos y los demás profesores del departamento.

Agradezco a todos mis colegas y amigos con los cuales he reído y compartido, en especial a Luis Inzunza y a Kevin Castillo, dos grandes amigos que sin ellos probablemente la vida sería diferente.

Y por encima de todo, agradezco a toda mi familia por el sacrificio que han hecho al criarme e insistirme tanto en estudiar y ser una buena persona.

A todos, no sé cómo han tenido tanta paciencia conmigo, pero que sepan que estoy muy agradecido.

Tabla de contenidos

Introducción.....	1
Capítulo 1: Montaje Experimental	4
1.1 Descripción	4
1.2 Sensores Piezoeléctricos	8
1.3 Mejoras al dispositivo experimental	10
1.3.1 Control de Energía.....	11
1.3.2 Voltaje Inverso para la Bobina de Voz.....	13
1.3.3 Automatización del Sistema de Precompresión	15
1.3.4 Viga de Retención para la bola impactadora	23
1.3.5 Imágenes.....	30
Capítulo 2: Procedimiento	33
2.1 Descripción de los materiales utilizados.....	33
2.2 Preparación de cada experimento	34
2.3 Procesamiento de los datos	36
Capítulo 3: Resultados Experimentales	43
3.1 Tiempo de vuelo en función de la velocidad de impacto	43
3.2 Otras Medidas.....	49
Capítulo 4: Análisis.....	54

Conclusión.....	57
Referencias Bibliográficas	59
Anexo	63

Índice de tablas

Tabla 1.1 Masa de las esferas usadas en el experimento.	9
Tabla 1.2. Secuencia del motor de pasos del sistema de precompresión.....	21
Tabla 1.3. Parámetros de la calibración del motor de pasos.....	22
Tabla 2.1. Características de los aceites ocupados para el experimento.....	33
Tabla 2.2. Características de los materiales utilizados para el experimento.	34
Tabla 2.3. Condiciones utilizadas para los experimentos.....	36
Tabla 3.1. Parámetros obtenidos para cadenas de distinto material.....	44
Tabla 3.2. Parámetros obtenidos para la cadena de acero.....	45
Tabla 3.3. Parámetros obtenidos para la cadena de bronce.....	46
Tabla 3.4. Parámetros obtenidos para la cadena de teflón.....	47
Tabla 3.5. Parámetros obtenidos para cadenas de distinto largo.....	48

Índice de Ilustraciones

Figura 1.1. Montaje experimental disponible inicialmente.	5
Figura 1.2. Forma del pulso entregado a la bobina de voz.	7
Figura 1.3 Estructura de los sensores.	10
Figura 1.4. Esquemático del control de la energía.	11
Figura 1.5. Diseño del control de la energía.	12
Figura 1.6. Esquemático para producir un voltaje inverso en la bobina de voz.	13
Figura 1.7. Diseño del circuito para producir el voltaje inverso.	14
Figura 1.8. Sistema de precompresión antiguo.	15
Figura 1.9. Subsistema para automatización del sistema de precompresión.	16
Figura 1.10. Diseño del nuevo sistema de precompresión.	17
Figura 1.11. Esquemático del controlador del motor de pasos.	18
Figura 1.12. Esquemático del multiplexor.	19
Figura 1.13 Esquemático del alimentador del motor de pasos del sistema de precompresión.	19
Figura 1.14. Diseño del multiplexor.	20
Figura 1.15. Diseño del alimentador.	20
Figura 1.16. Calibración del motor de pasos.	22
Figura 1.17 Pieza antigua del sistema de retención.	24
Figura 1.18. Diseño del nuevo sistema para retención.	25
Figura 1.19. Forma del nuevo pulso.	26
Figura 1.20. Esquemático del circuito que controla el sistema de retención.	27

Figura 1.21. Diseño del circuito que controla el sistema de retención.....	28
Figura 1.22. Calibración del sistema de retención.....	29
Figura 1.23. Imágenes del circuito del control de energía y del circuito que entrega el voltaje inverso a la bobina.....	30
Figura 1.24. Imágenes del circuito multiplexor, alimentador del motor de pasos y control del sistema de retención.	31
Figura 1.25. Imagen del sistema de retención.....	31
Figura 1.26. Imágenes del nuevo sistema de precompresión.	32
Figura 2.1. Señal obtenida por los sensores piezoeléctricos.....	37
Figura 2.2. Señal obtenida por las fotopuertas.....	38
Figura 2.3. Señal de la cerámicas piezoeléctricas suavizada.	39
Figura 2.4. Señal de las fotopuertas suavizada.....	39
Figura 2.5 Procedimiento para calcular el tiempo de vuelo.....	40
Figura 2.6. Procedimiento para calcular la velocidad de impacto.....	42
Figura 3.1. Tiempo de vuelo para cadenas de distinto material.	44
Figura 3.2. Tiempo de vuelo para la cadena de acero.	45
Figura 3.3. Tiempo de vuelo para la cadena de bronce.	46
Figura 3.4. Tiempo de vuelo para la cadena de teflón.	47
Figura 3.5. Tiempo de vuelo para cadenas de distinto largo.....	48
Figura 3.6. Tiempo de vuelo para una cadena seca de acero.	50
Figura 3.7. Tiempo de vuelo para una cadena de acero con aceite Axle.....	50
Figura 3.8. Tiempo de vuelo para una cadena de acero con aceite Hypoy.....	51
Figura 3.9. Correlación del caso seco.....	51
Figura 3.10. Correlación del caso con Axle.....	52

Figura 3.11. Correlación del caso con Hypoy..... 52

Introducción

Los medios granulares, medios compuestos por muchas partículas sólidas en contacto (como por ejemplo la arena, polvo, azúcar, etc.), se encuentran por doquier en la naturaleza, en los procesos industriales y, en general, en la vida cotidiana. Éstos aparecen en distintas ramas de la industria, tales como estudio de suelos, metalurgia, minería, química y farmacia, alimentos, agricultura, y nanotecnología, entre otros, por lo cual su estudio es muy importante para el diseño y construcción de maquinaria relacionada con el manejo de los mismos, o estructuras de almacenamiento (como podría ser un silo o un contenedor). El conocimiento detallado de las propiedades físicas de los medios granulares permite aumentar la efectividad y la eficiencia de los sistemas destinados a su manipulación y/o procesamiento (Cambou, 1998; Hill y Selvadurai, 2005; Sadovskaya y Sadovskii, 2012).

Un modo simple de estudiar estos medios es mediante una red unidimensional de esferas. Su interacción ha sido modelada teóricamente mediante la llamada interacción de Hertz, la cual da cuenta de la deformación elástica de las esferas (Johnson y Johnson, 1987), más un término viscoelástico que cuantifica la disipación asociada a la deformación de las esferas cuando un pulso se propaga a lo largo de la cadena (Goldobin, Susloparov, Pimenova, y Brilliantov, 2015). Este pulso es una onda solitaria cuyo tiempo de propagación desde el inicio hasta el final de la cadena, llamado tiempo de vuelo, está influenciado por los detalles de la

interacción entre las esferas (Nesterenko, 1983; Lazaridi y Nesterenko, 1985; Coste, Falcon y Fauve, 1997).

El tiempo de vuelo de la onda solitaria a través de la cadena de esferas es un funcional de las constantes elásticas de las mismas y adicionalmente –en el caso de cadenas con fluido intersticial– de las propiedades reológicas del fluido. Al cambiar el material de las esferas, se ha podido observar cómo un cambio en el balance entre las fuerzas elásticas e hidrodinámicas cambia la dinámica de la propagación de la onda solitaria a lo largo de la cadena, lo cual se ve finalmente reflejado en el tiempo de vuelo (Herbold, Nesterenko y Daraio, 2006; Olivares, Riveros, Manriquez, Labbé y Vergara, 2017; Job, Santibanez, Tapia y Melo, 2008; Labbé, Olivares y Vergara, 2017).

Así, el objetivo de este trabajo fue medir el tiempo de vuelo de una onda solitaria en función de la velocidad de impacto de la esfera impactadora, para cadenas de esferas hechas de distintos materiales. Específicamente: acero, bronce y teflón. Después de medir tiempos de vuelo como función de la velocidad de la esfera impactadora para cada material sin fluido intersticial, se añadieron cuatro tipos de fluidos intersticiales: aceite de bomba de vacío DS19, aceite sintético de motor Edge SAE 0W-30, aceite de caja de velocidades Axle 80W-90, y aceite para cajas de velocidades Hypoy SAE 90. Para este fin se utilizó un dispositivo automatizado, controlado mediante un computador personal, con el cual es posible obtener las mediciones de acuerdo con una secuencia especificada en el programa de control.

Durante el desarrollo de este trabajo, se realizaron diversas mejoras al dispositivo. Estas apuntaron, por un lado, a aumentar la seguridad y robustez del

dispositivo frente a fallas eléctricas y cortes de energía, y por el otro a mejorar el desempeño al aumentar el número de parámetros de control de los experimentos.

Los resultados de esta investigación podrían ser parte importante del desarrollo de procesos de control en procesos como la fabricación de bolas pertenecientes a distintas ramas de la ingeniería, tales como bolas para rodamientos, reguladores, válvulas o bolas de molienda para minería. Así también el estudio de las propiedades reológicas es de importancia para el control de calidad en la industria de alimento, pinturas, cosméticos, hidrocarburos, entre otros.

Capítulo 1: Montaje Experimental

1.1 Descripción

Para el estudio experimental de ondas solitarias que viajan por cadenas lineales de esferas, se han fabricado diversos montajes, tanto horizontales (Lazaridi et al., 1985; Coste et al., 1997; Herbold et al., 2006; Olivares et al., 2017; Job et al., 2008; Labbé et al., 2017; Job, Melo, Sokolow y Sen, 2005; Herrmann y Seitz, 1982) como verticales (Daraio, Nesterenko, Herbold y Jin, 2005; Yang, Silvestro, Khatri, De Nardo y Daraio, 2011; Ni, Rizzo, Yang, Katri y Daraio, 2012). Este último incluso se ha usado para la caracterización de materiales (Yang et al., 2011; Ni et al., 2012). Para producir la onda solitaria que viaja por la cadena se han usado bolas impactadoras que ganan velocidad con el uso de actuadores (Olivares et al., 2017; Labbé et al., 2017), excitadores vibratoriales (Coste et al., 1997) o dejándolas caer por un riel (Job et al., 2008). Y para medir el paso de la onda se han usado diferentes metodologías: sensores piezoeléctricos (Job et al., 2008; Labbé et al., 2017; Job et al., 2005; Daraio et al., 2005, Yang et al., 2011), métodos ópticos (Olivares et al., 2017) o electrónicos (Herrmann et al., 1982).

El montaje experimental disponible al inicio de este trabajo para la realización de los experimentos se muestra en la figura 1.1 (Labbé et al., 2017). Consiste en un dispositivo compuesto de dos rieles sobre los cuales son depositadas las esferas para formar la cadena, más un tercer riel ubicado en la parte superior de la cadena, pero sin hacer contacto con las esferas, en el cual se pueden instalar diversos

accesorios. El conjunto de rieles y soportes está apernado a una barra de bronce de sección cuadrada cuya masa aproximada es de $6[kg]$. La cadena está formada por 40 esferas¹ más una esfera impactadora y una semiesfera al final de la cadena. Ésta se encuentra unida, a través de un disco cerámico piezoeléctrico, a una pieza de acero (Ver figura 1.3) la cual a su vez está fijada a una gran masa de bronce ($4,5[kg]$ aproximadamente). Para medir el paso de la onda solitaria a través de la cadena se utiliza un sensor piezoeléctrico ubicado en la bola 7, y el ya mencionado al final de la cadena. La velocidad de impacto se mide utilizando una fotopuerta, la cual es activada directamente por la esfera impactadora.

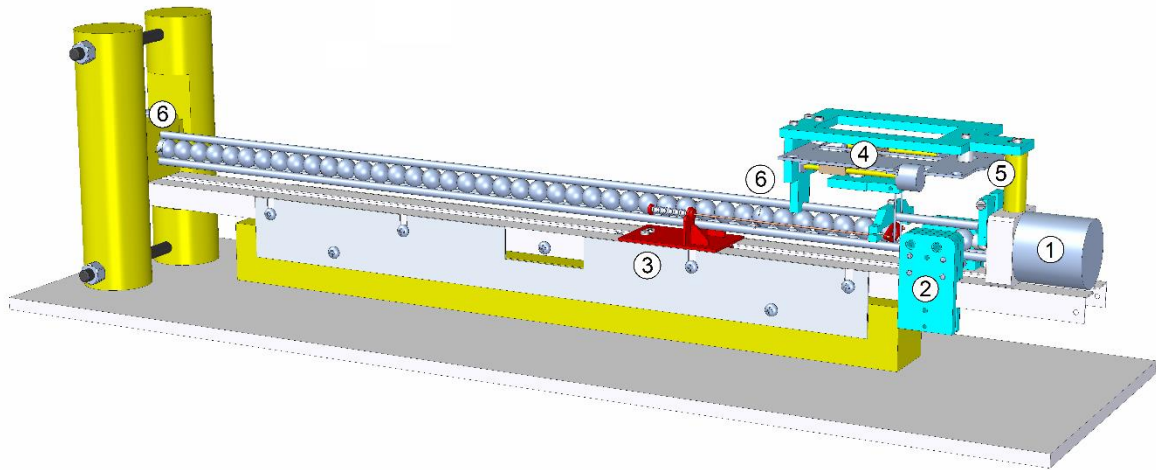


Figura 1.1. Vista del montaje experimental disponible inicialmente para hacer las mediciones. Posteriormente durante el trabajo de tesis se le hicieron modificaciones. Se aprecia en en la imagen la bobina de voz (1), fotopuerta (2), sistema de precompresión (3), sistema de reposición de la bola impactadora (4), sistema que mantiene la bola impactadora en su lugar antes del disparo (5) y los sensores para medir el paso de la onda solitaria (6) (Ver texto para más detalles).

¹ Esferas de diámetro $0,5[pulgadas]$ ($12,7[mm]$ aprox.).

La onda solitaria es generada al impactar una bola del mismo material (bola impactadora) contra la cadena, impulsada por la armadura de una bobina de voz². La bobina de voz es controlada con el computador a través de un amplificador de transconductancia, que entrega una corriente en función de un voltaje de entrada, con una constante de transconductancia de $-0,97[A/V]$. El voltaje es entregado desde el computador por una salida analógica de la tarjeta PCI-6251³ de National Instruments a una tasa de $100[kS/s]$. La forma del pulso proporcionado por el computador se muestra en la figura 1.2, el cual en su parte inicial entrega un pequeño voltaje positivo para generar una corriente de retención en la bobina. El pulso negativo es para acelerar la armadura (junto con la bola), y la parte positiva es para frenarla al final de su recorrido, evitando que choque con el yugo que sostiene el imán permanente.

Cuando la bola impactadora es impulsada por la armadura de la bobina de voz, ésta pasa por dos fotopuertas, de cuya señal es posible determinar la velocidad que adquirió antes de que impacte a la cadena. La fotopuerta más cercana al inicio de la cadena está ubicada a unos $13,7[mm]$ ($0,5[pulgadas] + 1[mm]$ aprox.) de ésta, y con la señal adquirida por ésta se determina la velocidad que lleva la bola impactadora justo antes de golpear la cadena. La otra fotopuerta está a $15,7[mm]$

² G+ VM4040-315. Constante de Fuerza: $5[N/A]$. Resistencia: $4,6[\Omega]$.

³ 8 entradas analógicas de 16 bits ($1[MS/s]$ repartido en los 8 canales, si es solo un canal sube a $1.25[MS/s]$), 2 salidas analógicas de 16 bits, y 24 E/S digitales.

de la primera, y permite medir la velocidad adquirida al ser impulsada por la bobina de voz.

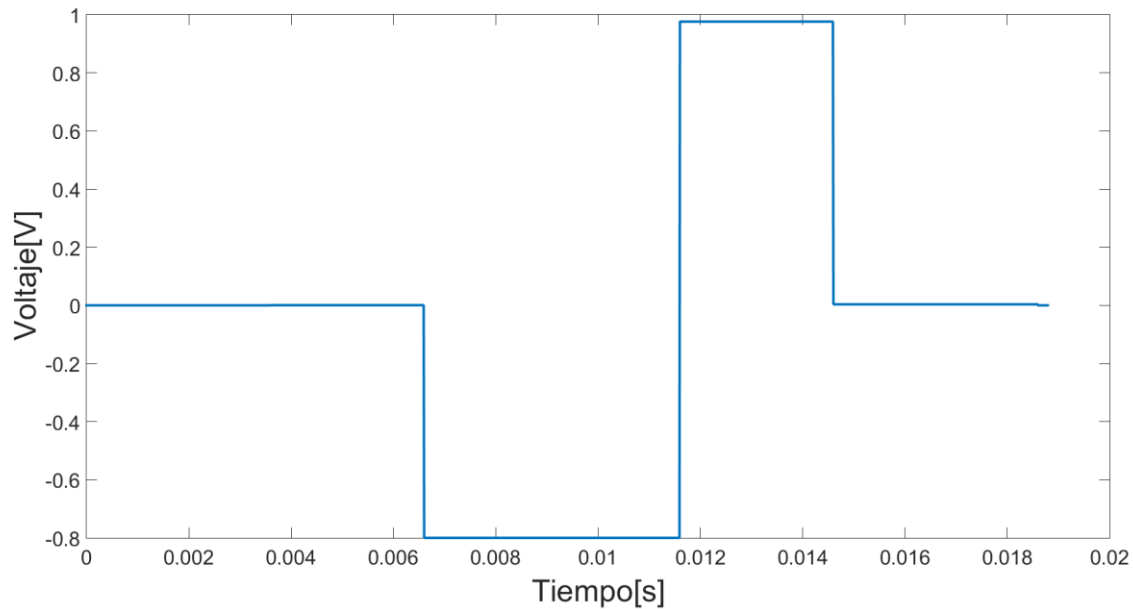


Figura 1.2. Pulso generado por el programa de control y transformado en voltaje con la tarjeta PCI-6251, cuya salida análoga se conecta a la entrada del amplificador de transconductancia. Este último entrega un equivalente en corriente a la bobina de voz. Ver texto para más detalles.

El dispositivo cuenta con accesorios para controlar la horizontalidad en el plano. Se le da una pequeña inclinación al sistema y se cubren los rieles con una delgada capa de teflón⁴ con el fin de reducir la fragmentación de la cadena con el paso de los pulsos. También cuenta con un soporte ajustable para evitar que los rieles pandeen y un sistema compuesto por dos resortes para ejercer una fuerza de precompresión sobre la cadena (Ver figura 1.8). Esta fuerza se controla mediante el desplazamiento de los extremos de los resortes, con una distancia de compresión

⁴ Topex, 0,075[mm] de espesor.

que es posible determinar, y una constante elástica de $0,12[N/mm]$. El dispositivo también cuenta con un sistema de reposicionamiento de la bola impactadora que funciona de manera automática usando un motor de pasos controlado desde el computador haciendo uso de un puerto digital de la tarjeta PCI-6251.

El dispositivo experimental cuenta con una fuente de alimentación compuesta de tres secciones: la primera sección consta de un transformador que toma la tensión de la red y produce $16[V]$ y $9[V]$ en voltaje alterno y entrega hasta $3[A]$ en corriente. La segunda sección es un multiplicador de tensión capaz de producir un voltaje continuo de $\pm 47[V]$, del cual se extrae la energía para impulsar la bobina de voz. Y la tercera parte es una fuente de voltaje regulado de $\pm 5[V]$ y $\pm 15[V]$ para alimentar diferentes partes del dispositivo.

1.2 Sensores Piezoeléctricos

Una cerámica piezoeléctrica es un material que frente a una deformación produce una separación de cargas eléctricas opuestas, y así también se deforma frente a un campo eléctrico aplicado sobre ella. Es por esto por lo que usualmente es ocupada como sensor de fuerza o deformación.

Para este experimento, se ocuparon cerámicas piezoeléctricas PSI-5A4E Piezo Systems de $12,5[mm]$ de diámetro, $0,191[mm]$ de grosor, y una masa de $0,183[g]$ (las especificaciones técnicas son mostradas en el apéndice). A estos sensores se les suelda un cable torcido con soldadura libre de plomo, utilizando un

fundente especial (tanto la soldadura como el fundente son suministrados por Piezo Systems).

Para la construcción de las bolas con sensores, primero se cortan varias esferas aproximadamente a la mitad con una sierra de alta precisión⁵. Lo que se busca son dos mitades que tengan la superficie lisa y cuyas masas, junto con la del sensor, sea igual a la de una esfera normal (Ver tabla 1.1). En caso de tener exceso de masa en alguna de las mitades, es posible sacar un poco de material en la sección de corte usando una lija al agua fina sobre una superficie plana y lisa.

Tabla 1.1 Masa de las esferas usadas en el experimento.

Material	Masa $\pm 0,01$ [g]
Acero	8,55
Bronce	9,10
Teflón	2,32

Para el caso de la semiesfera que va al final de la cadena, se utiliza una mitad de esfera que tenga aproximadamente la mitad de la masa de una esfera.

Luego la bola y el sensor se arman según se muestra en la figura 1.3. Para el caso de las bolas de acero y bronce, se usó Kapton entre el sensor y el material (Yang et al., 2011), el cual es un buen aislante eléctrico, y la cerámica se pegó a éste con un adhesivo instantáneo, mientras que para el caso del teflón no se usó Kapton, si no que un imprimador⁶, el cual mejora la adhesión entre un adhesivo instantáneo y un plástico de baja energía superficial (que es el caso del teflón).

⁵ IsoMet, Low Speed Saw, Precision Sectioning Saw. Buehler.

⁶ LOCTITE SF 770.

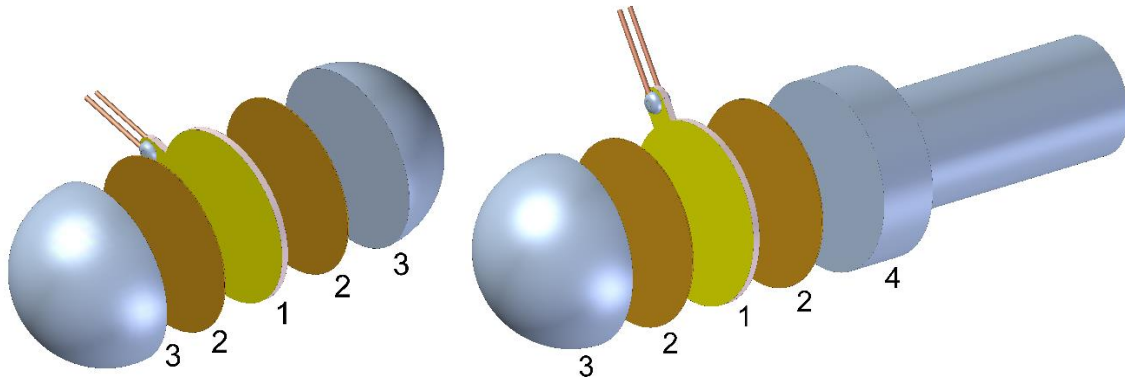


Figura 1.3 (Izquierda) Sensor ubicado dentro de la cadena. (Derecha) Sensor ubicado al final de la cadena. Los materiales son (1) cerámica piezoeléctrica, (2) Kapton, (3) Semiesfera y (4) Pieza de acero que se une a una gran masa de bronce. Para el caso de semiesfera de teflón, se cambia el Kapton por un imprimador.

Las señales generadas por las cerámicas pasan a amplificadores de carga y luego son sumadas. La suma es filtrada mediante un filtro pasivo RC y digitalizada por el computador mediante una entrada analógica de la tarjeta PCI-6251, con una frecuencia de muestreo de $500[kS/s]$.

1.3 Mejoras al dispositivo experimental

Para aumentar las posibilidades de medición y mejorar la calidad de las mismas, además de proporcionar mayor seguridad en el funcionamiento y prevenir daños en el caso de cortes de energía, se diseñaron y construyeron los sistemas y dispositivos que se describen a continuación.

1.3.1 Control de Energía

Se construyó un circuito capaz de energizar o desenergizar (On/Off) el transformador, así como de cortocircuitar la bobina de voz, según se muestra en la figura 1.4. Esto es necesario ya que, al cortar el suministro de energía al dispositivo, el amplificador de transconductancia se desestabiliza entregando un pico de corriente a la bobina de voz, lo cual la daña seriamente.

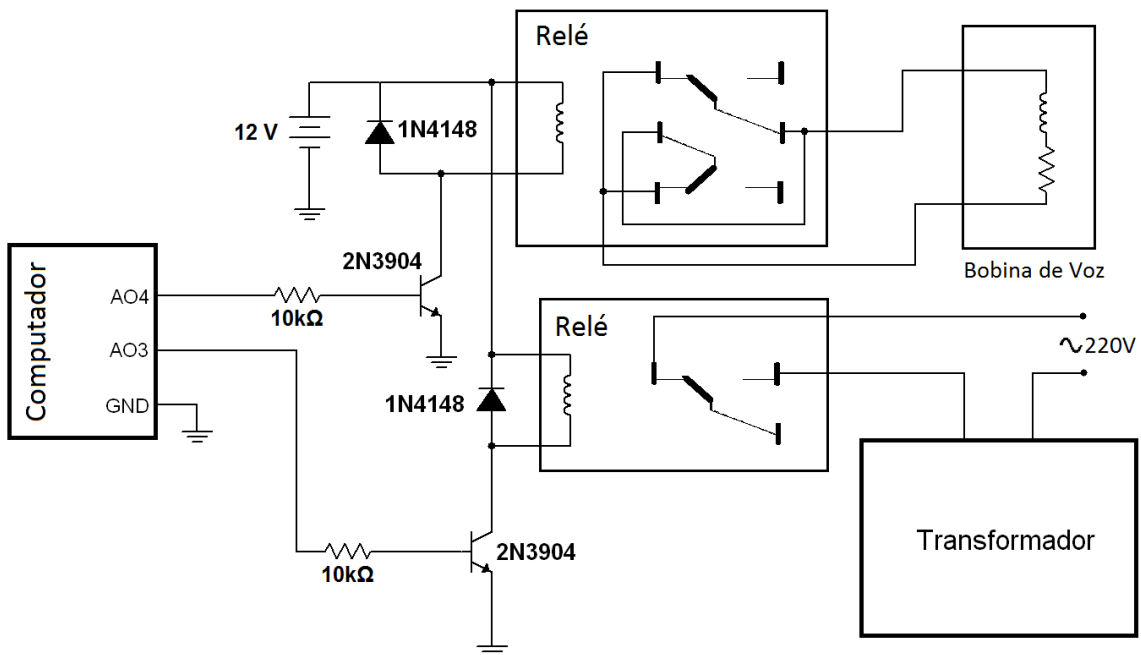


Figura 1.4. Esquemático del control de la energía del montaje experimental.

El circuito que cumple esta función está descrito en la figura 1.4. Haciendo uso de relés es posible energizar el sistema⁷ y cortocircuitar la bobina⁸. En el estado

⁷ E-51 Italiana Relè Alimentación.

⁸ W67CSX-2 Miniature Enclosed Industrial Relay Magnecraft.

apagado, el sistema está desenergizado y la bobina de voz se encuentra cortocircuitada. Para dar la orden de energizar los relés, se utilizan dos salidas análogas de la tarjeta PCI-6703⁹ de National Instruments que proporcionan hasta $\pm 10[V]$, los cuales activan un transistor 2N3904 que permite el paso de corriente por el relé respectivo. Los relés son alimentados con un transformador externo. Las bobinas de los relés además cuentan cada uno con un diodo en paralelo que protegen al circuito de la sobretensión que se produce al pasar del estado energizado al desenergizado en las bobinas.

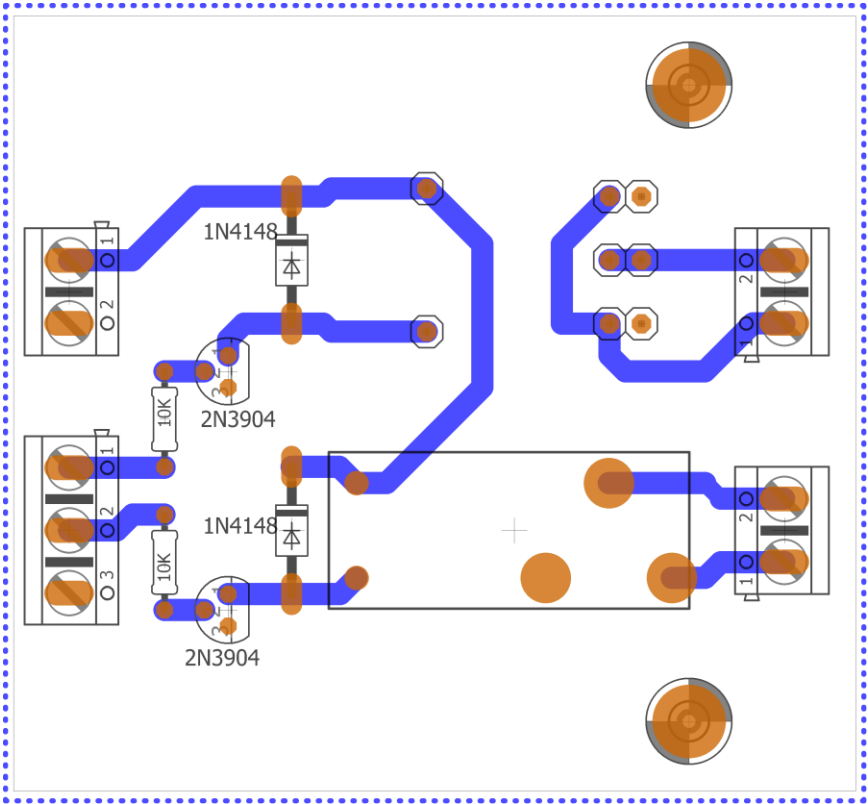


Figura 1.5. Diseño en Eagle del circuito de la figura 1.4.

⁹ 16 salidas analógicas de 16 bits, y 8 E/S digitales.

El diseño del circuito impreso fue hecho en Eagle, como muestra la figura 1.5, para la posterior conversión a lenguaje HPGL (el lenguaje para plóter de Hewlett-Packard) y fabricación en una máquina CNC¹⁰.

1.3.2 Voltaje Inverso para la Bobina de Voz

Se construyó el circuito de la figura 1.6, para alimentar con un voltaje inverso constante a la bobina de voz, independientemente de la salida del amplificador de transconductancia, para forzar la armadura a su posición de máxima retracción.

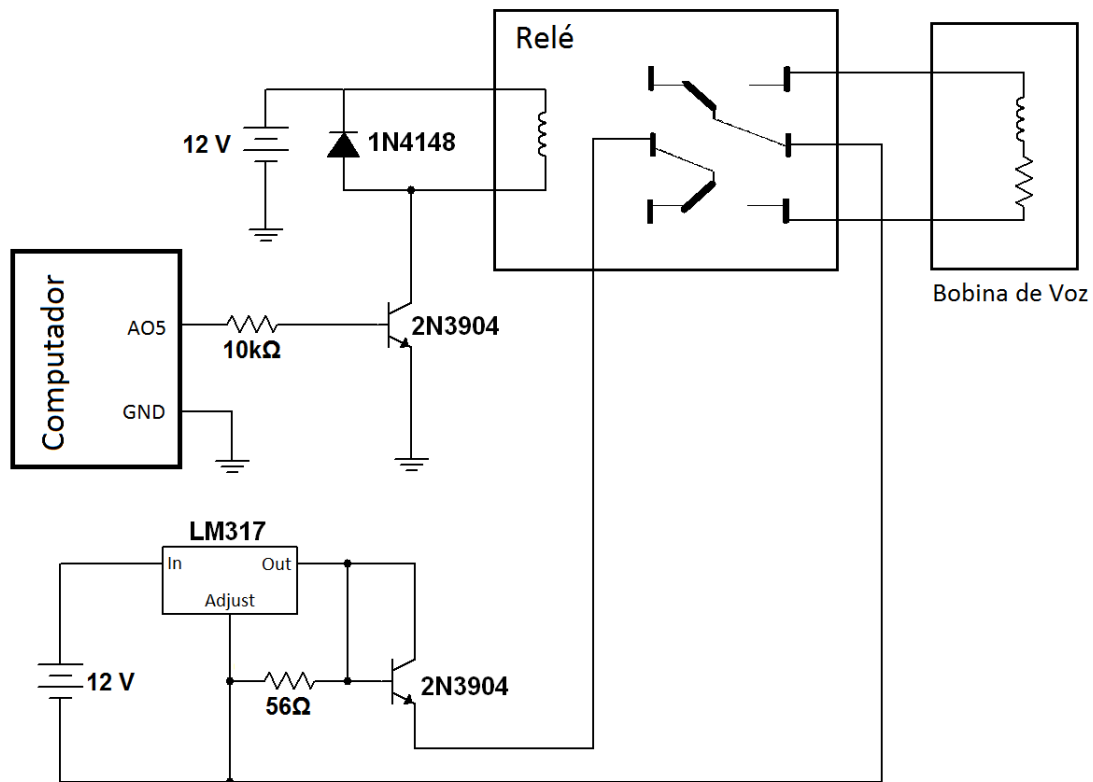


Figura 1.6. Esquemático para producir un voltaje inverso en la bobina de voz.

¹⁰ Bungard CCD.

Este voltaje inverso en la bobina es necesario después de cada disparo, debido a que lo único que hace retroceder a la armadura es el sistema de reposicionamiento que, al empujar la bola empuja también a la misma. Pero si la bola se descarrila, o el sistema se atasca, la corriente que ingresa a la bobina hará avanzar a la armadura hasta un punto que puede chocar con el yugo, dañándola. Para evitar este problema, se armó un circuito (Figura 1.6) usando un LM317, el cual entrega un pequeño voltaje (del orden de $100[mV]$) que hace retroceder a la armadura cada vez que se reposiciona la bola impactadora. Éste es aplicado a la bobina de voz por medio de un relé¹¹, el cual es activado con una salida análoga de la tarjeta PCI-6703.

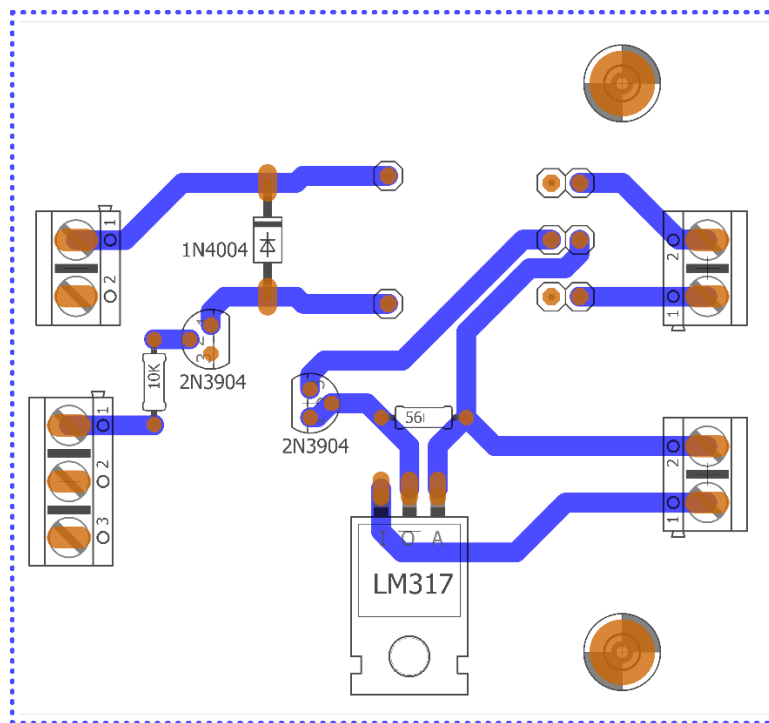


Figura 1.7. Diseño en Eagle del esquemático de la figura 1.6.

¹¹ W67CSX-2 Miniature Enclosed Industrial Relay Magnecraft.

El circuito impreso es mostrado en la figura 1.7. Se agregó al LM317 un pequeño disipador hecho con aluminio.

1.3.3 Automatización del Sistema de Precompresión

Se automatizó el sistema de precompresión existente, lo cual permite controlar desde el computador la fuerza de precompresión inicial de la cadena. La pieza existente es mostrada en la figura 1.8. Esta pieza es puesta al comienzo de la cadena y al desplazarla, ésta ejerce una fuerza de compresión sobre la cadena por la compresión de los resortes. Teniendo la compresión deseada se fija con los tornillos al montaje.

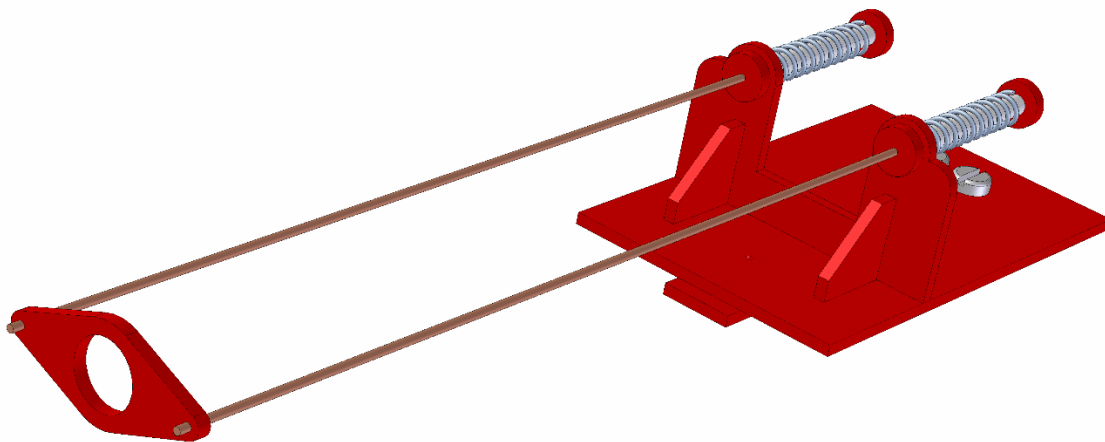


Figura 1.8. Pieza que constituye el antiguo sistema de precompresión a la cadena.

Para la automatización se recicló un motor de pasos de una disquetera, y junto a éste se diseñó el sistema completo en Solid Edge, asegurándose de que las

dimensiones del sistema permitían su inserción dentro de la estructura del montaje experimental. El resultado del diseño es mostrado en la figura 1.9, el cual se construyó con placas para circuito impreso, por lo que las uniones fueron soldadas con estaño.

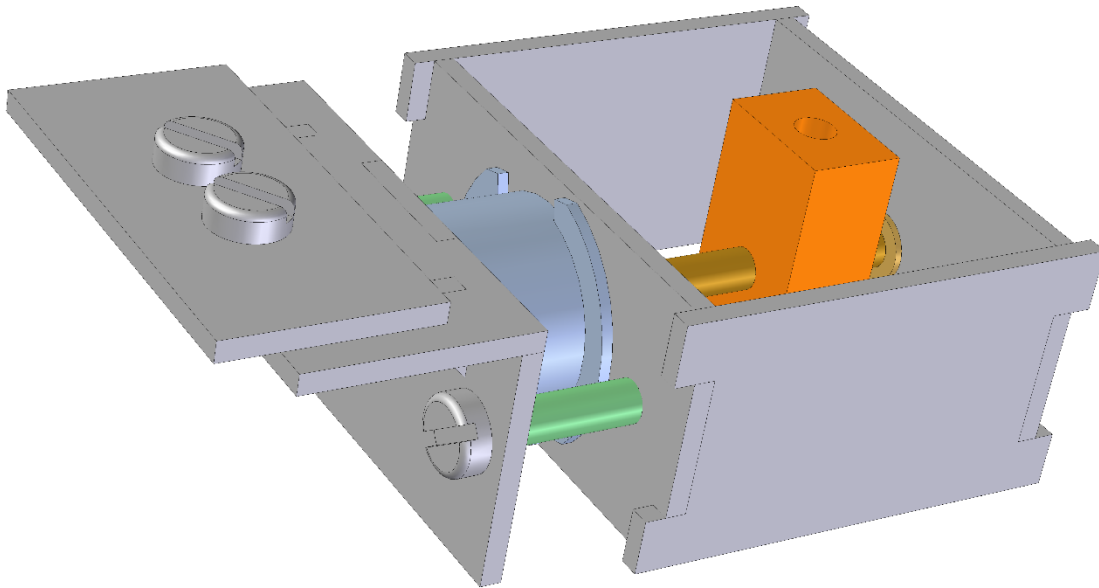


Figura 1.9. Subsistema construido para la automatización del sistema de precompresión, usando un motor de pasos. La pieza central (Color Naranja) que se mueve al girar el motor se fija al sistema antiguo de precompresión con lo cual adquiere un movimiento longitudinal horizontal. Los dos tornillos superiores se encargan de mantener este subsistema fijo al montaje.

Hay una pieza central construida con PVC que avanza o retrocede con el giro del motor de pasos, esta pieza se fija al sistema de precompresión existente (Ver figura 1.10) utilizando un tornillo M3. Se lubrica con un poco de aceite el contacto del antiguo sistema de precompresión con el montaje para que pueda moverse con el mínimo roce posible.

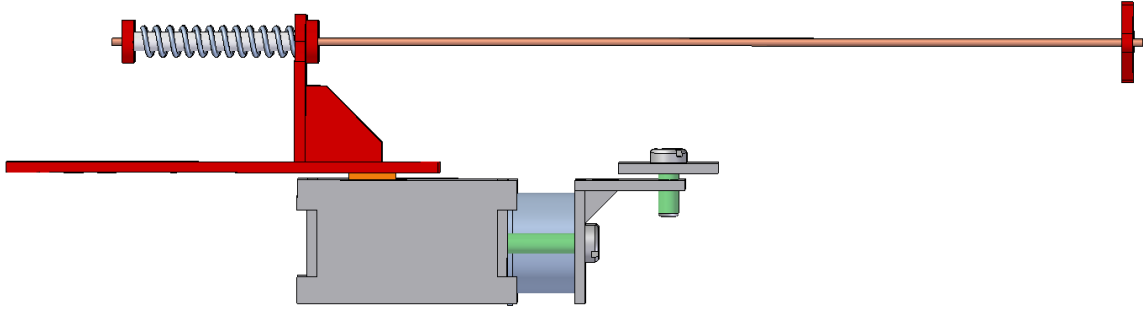


Figura 1.10. Diseño completo del sistema de precompresión del experimento, uniendo las partes mostradas en la figura 1.9 y en la figura 1.10.

Para el control del motor, se ocupó el controlador hecho para el motor de pasos del sistema de reposicionamiento de la bola impactadora (mostrado en la figura 1.11), por lo que se construyó un circuito multiplexor capaz de redirigir las señales al respectivo motor con el uso de relés. También fue necesario construir un circuito capaz de entregar un voltaje suficiente al motor para que se moviera, ya que la resistencia interna de ambos motores es diferente (motor de reposicionamiento: $6,4[\Omega]$, motor de precompresión: $16,2[\Omega]$). Ambos circuitos son mostrados en las figuras 1.12 y 1.13 y los diseños para su construcción en circuitos impresos son mostrados en las figuras 1.14 y 1.15.

La multiplexión se hace utilizando una línea de un puerto digital de la tarjeta PCI-6703. Fue necesario incluir 4 diodos en la alimentación del multiplexor para reducir el voltaje que alimenta a los relés¹², el cual debe ser cercano a las $12[V]$. La posición no energizada de los relés direccionan la señal del controlador hacia el

¹² A178URE1 Printed Circuit Board Standard Relay Class Magnecraft.

motor de reposicionamiento, que es la configuración por defecto. Se usaron transistores FZT653 y FZT753, los cuales tienen una capacidad de corriente de 2[A] y son de montaje en superficie.

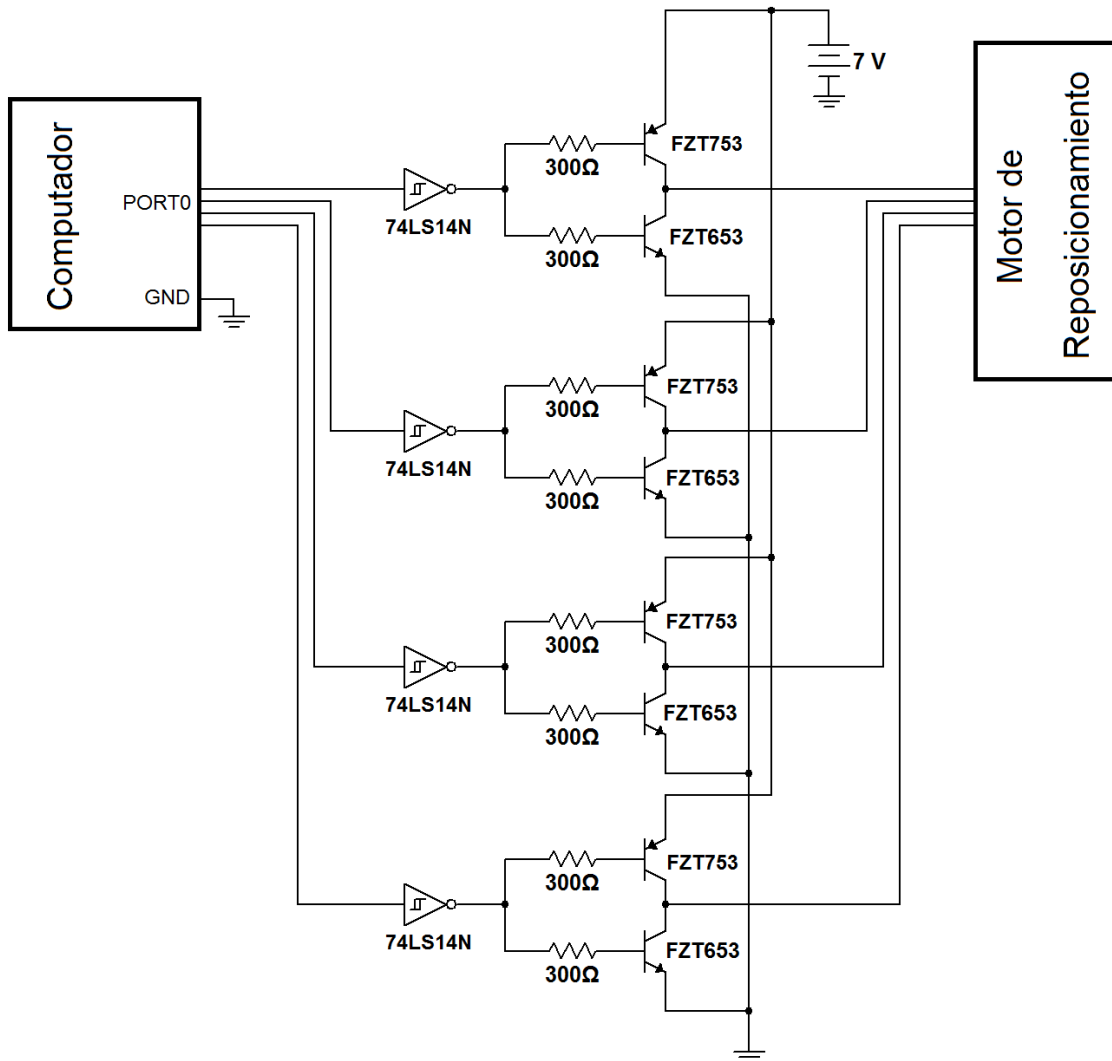


Figura 1.11. Esquemático del controlador utilizado para controlar el motor del sistema de reposicionamiento de la esfera, y reutilizado para controlar el motor del sistema de precompresión.

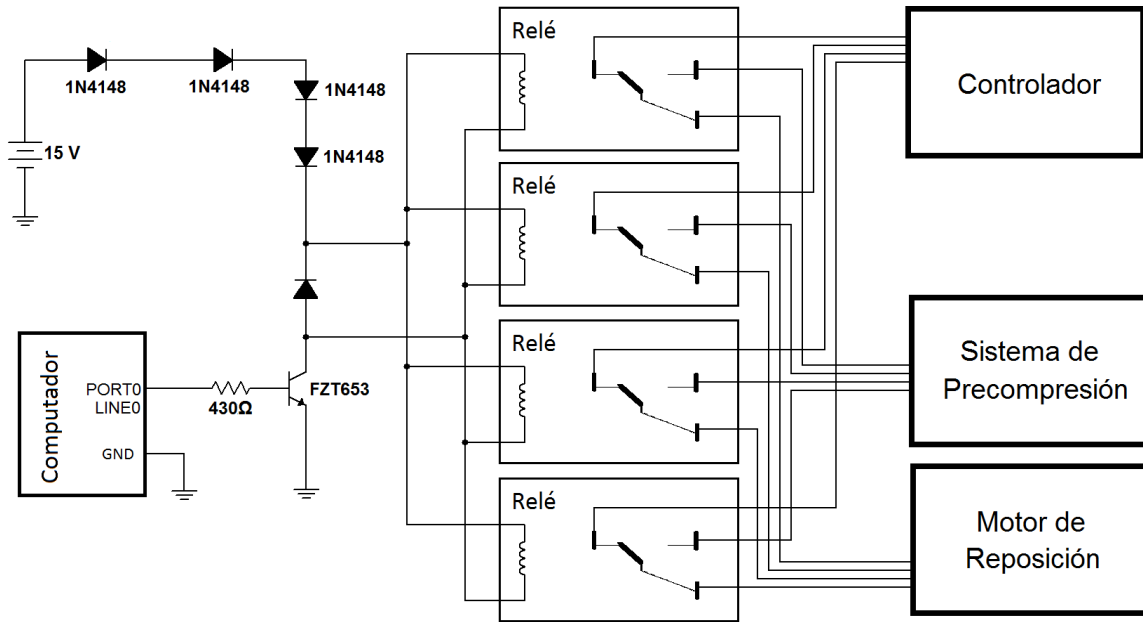


Figura 1.12. Esquemático del multiplexor, que redirecciona la orden que viene desde el controlador hacia el motor de reposicionamiento de la esfera impactadora y hacia el motor del sistema de precompresión.

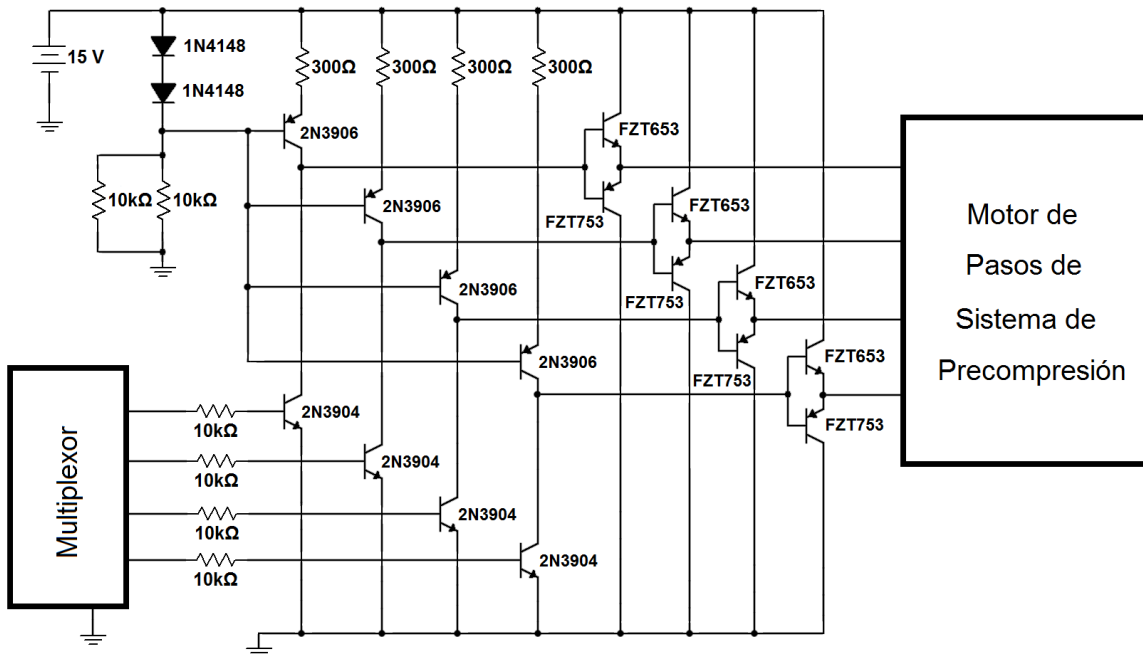


Figura 1.13 Esquemático del circuito utilizado para entregar el voltaje necesario para mover el motor del sistema de precompresión, a partir de la señal que viene del multiplexor.

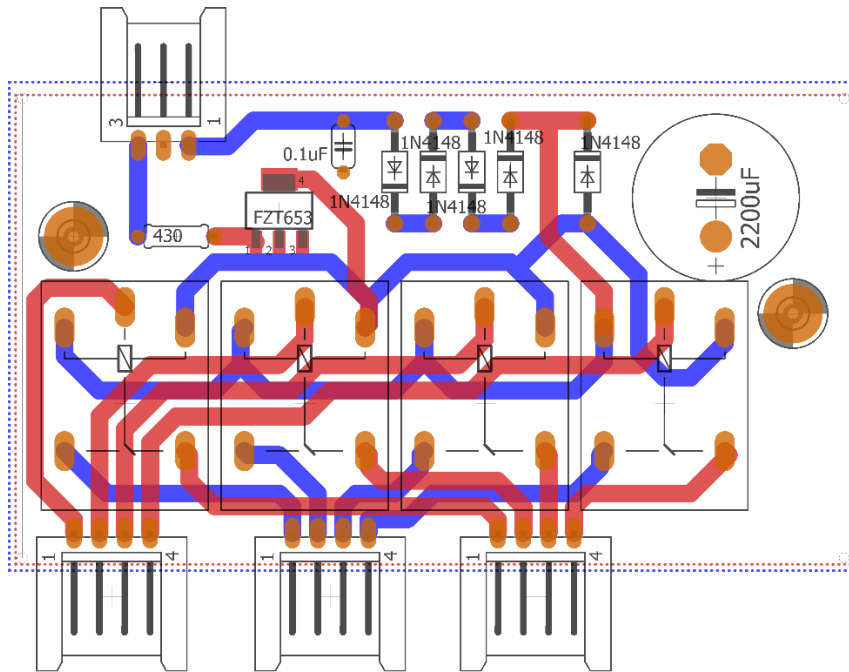


Figura 1.14. Diseño en Eagle del esquemático de la figura 1.12. Las líneas rojas son las pistas de la cara superior y las azules las de la cara inferior.

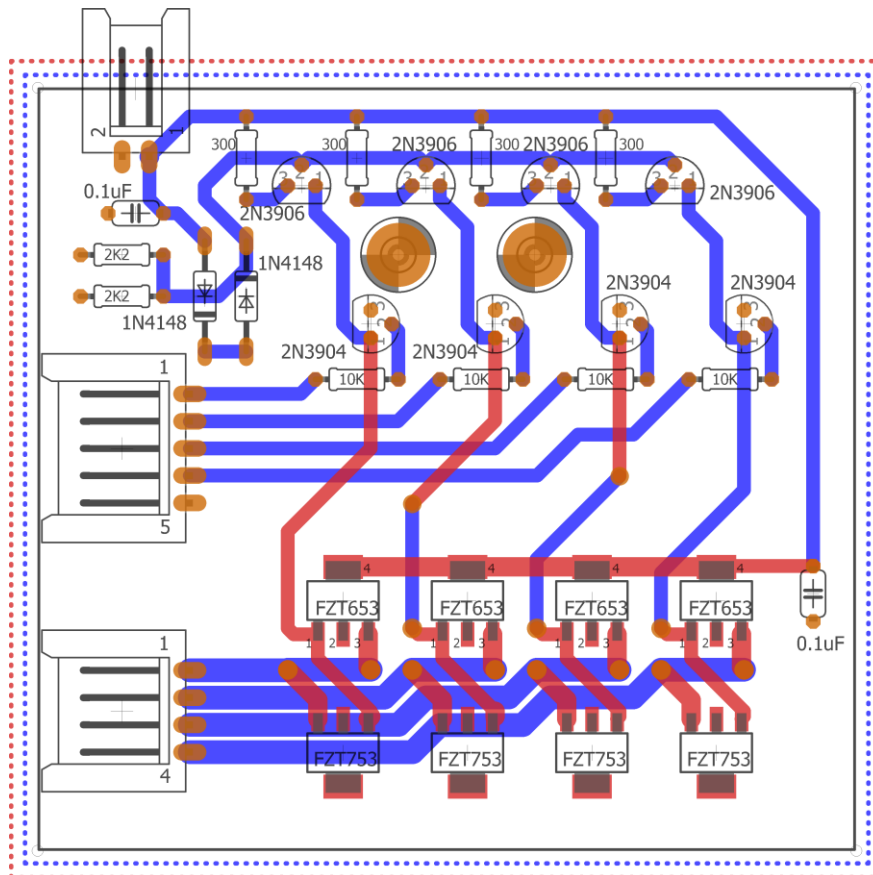


Figura 1.15. Diseño en Eagle del esquemático mostrado en la figura 1.13.

El control del motor es hecho subiendo y bajando los puertos digitales según la secuencia mostrada en la tabla 1.2. El programa con el cual se controla el motor se hizo en LABVIEW.

Tabla 1.2. Secuencia que permite el movimiento del motor de pasos del sistema de precompresión.

Secuencia	Secuencia Binaria	Equivalencia Decimal
0	0001	1
1	1001	9
2	1000	8
3	1010	10
4	0010	2
5	0110	6
6	0100	4
7	0101	5

Una vez armado y montado el sistema y hecho el programa que lo controla, se hizo una calibración al sistema midiendo la distancia que se mueve la pieza antigua de precompresión (figura 1.8) en función del número de pasos, obteniéndose el gráfico de la figura 1.16.

Al utilizar el algoritmo de mínimos cuadrados a los datos del gráfico de la figura 1.16, se obtienen los parámetros para una función lineal, descritos en la tabla 1.3.

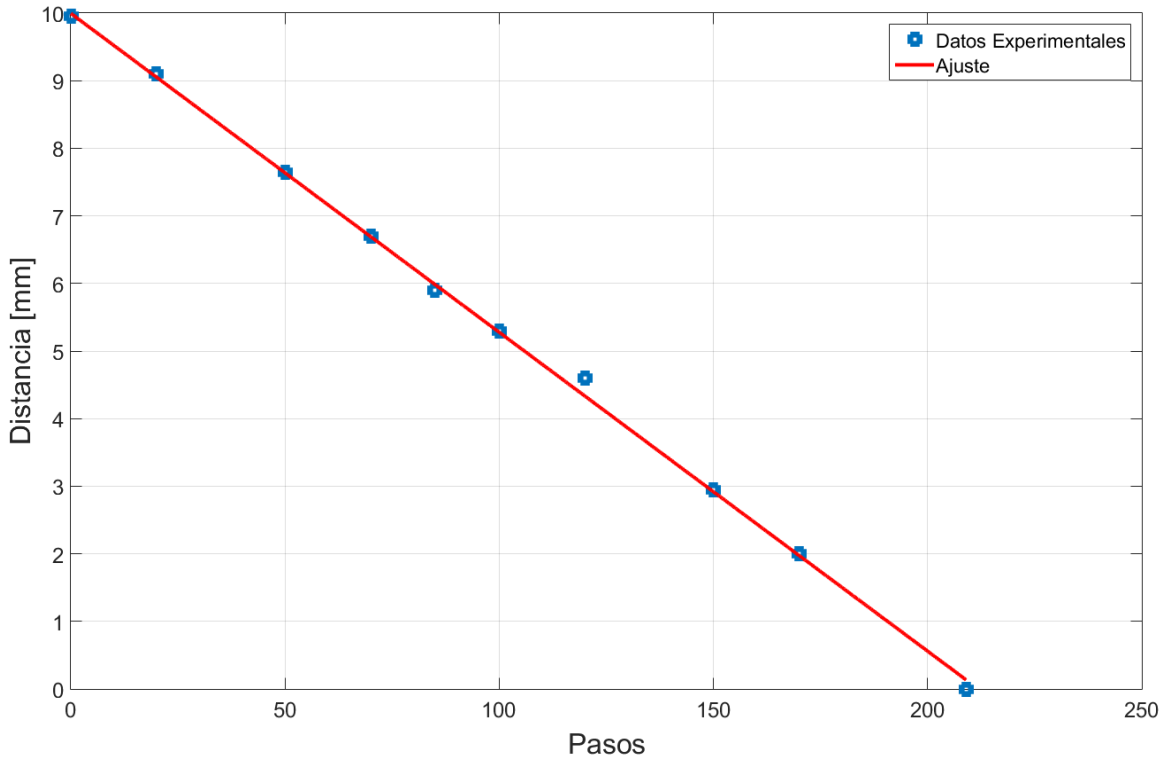


Figura 1.16. Gráfico de distancia recorrida por el sistema de precompresión en función del número de pasos indicado al motor de pasos.

Tabla 1.3. Parámetros encontrados al hacer el un ajuste lineal a los datos del gráfico presentado en la figura 1.16.

Parámetro	Valor
Pendiente m	$-0,0474 \pm 0,0011 [mm/pasos]$
Intercepto b	$10,01 \pm 0,13 [mm]$
Coefficiente de correlación lineal r	0,9996

Así se obtiene con la pendiente que, para avanzar un milímetro, el motor tiene que dar $21,1 [pasos]$. Esto con un error relativo porcentual del 2,32%.

Con esta información fue posible crear un programa en LABVIEW el cual, al ingresar los milímetros que se quiere desplazar, éste los convierte en número de

pasos que debe mover el motor y con ello controlar la precompresión inicial ejercida sobre la cadena de esferas.

1.3.4 Viga de Retención para la bola impactadora

Se mejoró el sistema de disparo existente, fabricando un nuevo dispositivo para éste. Consiste en una viga que contiene dos hilos de acero para la retención de la bola impactadora. La viga de retención se levanta antes del disparo y baja una vez que la bola es repuesta en su lugar para el siguiente disparo (Ver figura 1.18).

La pieza que se usaba anteriormente es la mostrada en la figura 1.17. Esta ejercía fuerza en la bola para retenerla mediante dos hilos de acero, luego la armadura ejercía la fuerza para sacar la bola del sistema de retención, y el sistema de reposicionamiento proporcionaba la fuerza para poder restaurar la bola. Esta pieza iba insertada en la barra superior del montaje (ver el montaje en la figura 1.1) y apretada por el tornillo superior mostrado en la figura.

El problema con ese sistema es que se movía un poco con cada disparo, dependiendo de las fuerzas ejercidas por la bobina de voz y el sistema de reposicionamiento. Esto cambiaba la fuerza inicial sobre la bola impactadora, y con esto, la velocidad a la que se sale la bola disparada, para una misma corriente. Lo anterior aumentaba considerablemente la variabilidad de la velocidad de impacto para una misma corriente aplicada a la bobina de voz.

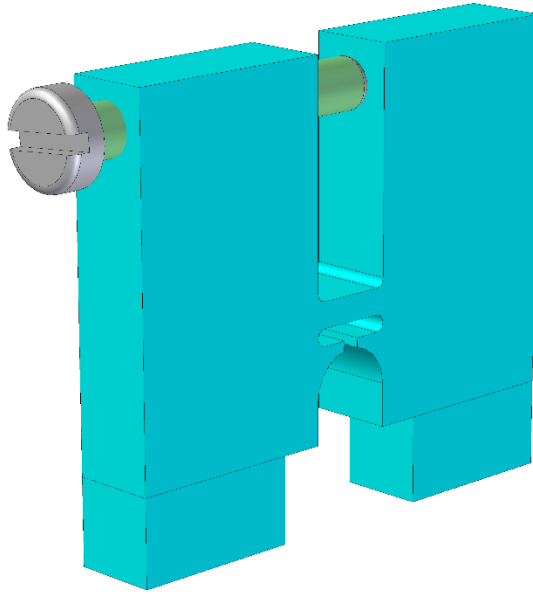


Figura 1.17 Pieza antigua hecha de teflón que mantenía la bola impactadora en su lugar antes de ser impulsada por la bobina de voz. En la imagen faltan los hilos de acero con forma de gancho que retenían a la bola en su posición de disparo.

Para disminuir la variabilidad de la velocidad de impacto para una misma corriente de impulso, se diseñó un nuevo sistema en Solid Edge, mostrado en la figura 1.18, el cual cuenta con un motor de corriente continua¹³ y una viga de retención hecha con PVC para mantener la bola impactadora en su sitio. El motor, dependiendo del sentido de rotación, levanta o baja la viga de retención y con esto libera o retiene a la bola. La pieza de agarre fue hecha de tal manera que, al ser montado en el sistema, haga contacto con la barra superior del montaje al moverse para liberar o retener la bola; es decir, la viga de retención tiene posiciones límite para ambos sentidos de giro. La viga de retención se sujeta a una pieza superior

¹³ DC Mini Motor M25E-4 Mitsumi. Especificaciones en el apéndice.

ubicada en el sistema, utilizada como soporte tanto para el sistema de reposicionamiento como para algunos de los circuitos del montaje.

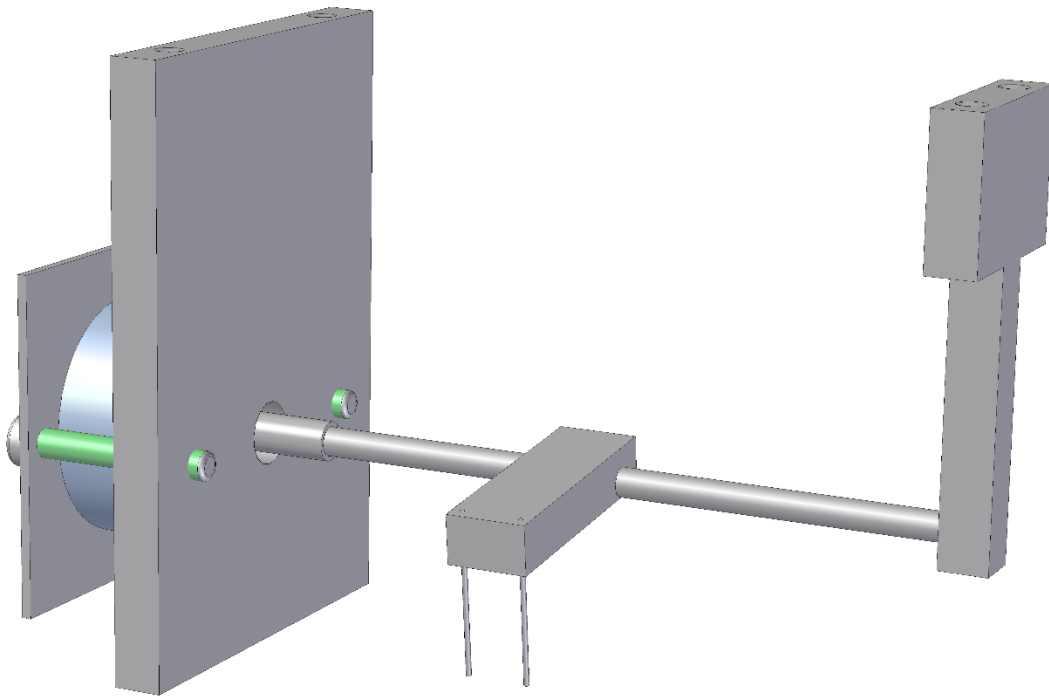


Figura 1.18. Diseño en Solid Edge del sistema que mantiene la bola impactadora en su posición inicial antes de ser impulsada por la bobina de voz.

Para el funcionamiento del sistema, se modificó la señal que llega al amplificador de transconductancia: se agrega un pulso de $1[V]$ y una duración de $10\mu s$ antes de la llegada de la señal de disparo, la cual indicará al sistema que levante la viga de retención antes del disparo. La nueva señal es mostrada en la figura 1.19. Cabe destacar que este diseño aprovecha el hecho de que el ancho de banda del amplificador de transconductancia es insuficiente para amplificar el nuevo pulso al comienzo de la señal, por lo cual dicha señal prácticamente no tiene efecto sobre el sistema de disparo. Por otro lado, una vez que el circuito que controla el

motor de la viga de retención es activado por el pulso rápido, es insensible al pulso de disparo de la bola impactadora. En la práctica, esto constituye un esquema de multiplexión que combina la separación de bandas de frecuencia con el estado del sistema de control de la viga de retención.

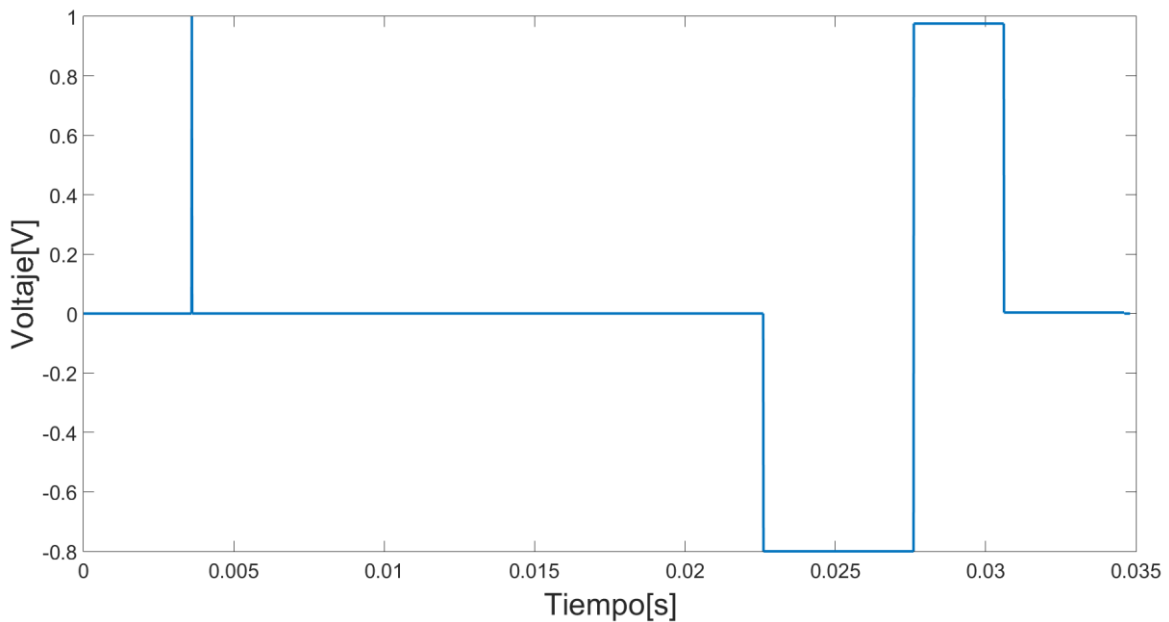


Figura 1.19. Gráfica de la nueva señal entregada ahora tanto al amplificador de transconductancia como al sistema de viga de retención, el cual se activaría con el pulso entregado al comienzo de la señal.

Para controlar el sistema de retención se diseñó el circuito de la figura 1.20, el cual cuenta con un amplificador inversor que limita el voltaje de salida por medio de diodos, un multivibrador biestable, que frente a una señal (el pulso de 1[V] de la señal) cambia de estado y se mantiene así hasta que se le da la orden de volver al estado inicial, y un amplificador en la etapa final que suministra la energía al motor. Esto controla el sentido de giro del motor, permitiendo que se produzca el movimiento deseado. La orden de cambiar de estado del multivibrador biestable

(para que la viga retenga la esfera) es dada por una línea de un puerto digital de la tarjeta PCI-6703.

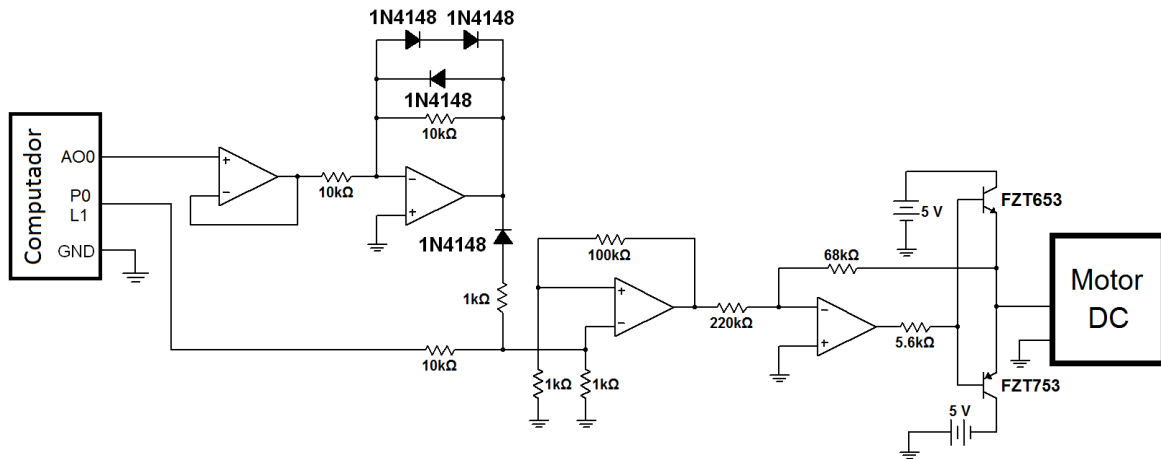


Figura 1.20. Esquemático del circuito que controla el sistema de retención de la bola impactadora.

El diseño en Eagle del circuito es mostrado en la figura 1.21. Se usó un TL074, que cuenta con 4 amplificadores operacionales incorporados, además se agregaron capacitores en la alimentación los cuáles ayudan a mejorar la estabilidad. Como el motor usualmente se mantiene detenido, circula constantemente corriente por él y, por tanto, por los transistores, por lo cual se dejó un espacio libre alrededor de ellos, ya que éstos disipan el calor hacia la placa. Además, como el motor permanece la mayor parte del tiempo detenido en una dirección (cuando está reteniendo la bola), uno de los transistores disipa más potencia (el transistor FZT653), por lo cual se montó sobre él un trozo extra de cobre, para así mejorar la disipación de calor. El amplificador fue alimentado con $\pm 15V$ y los transistores que proporcionan voltaje al motor con $\pm 5V$.

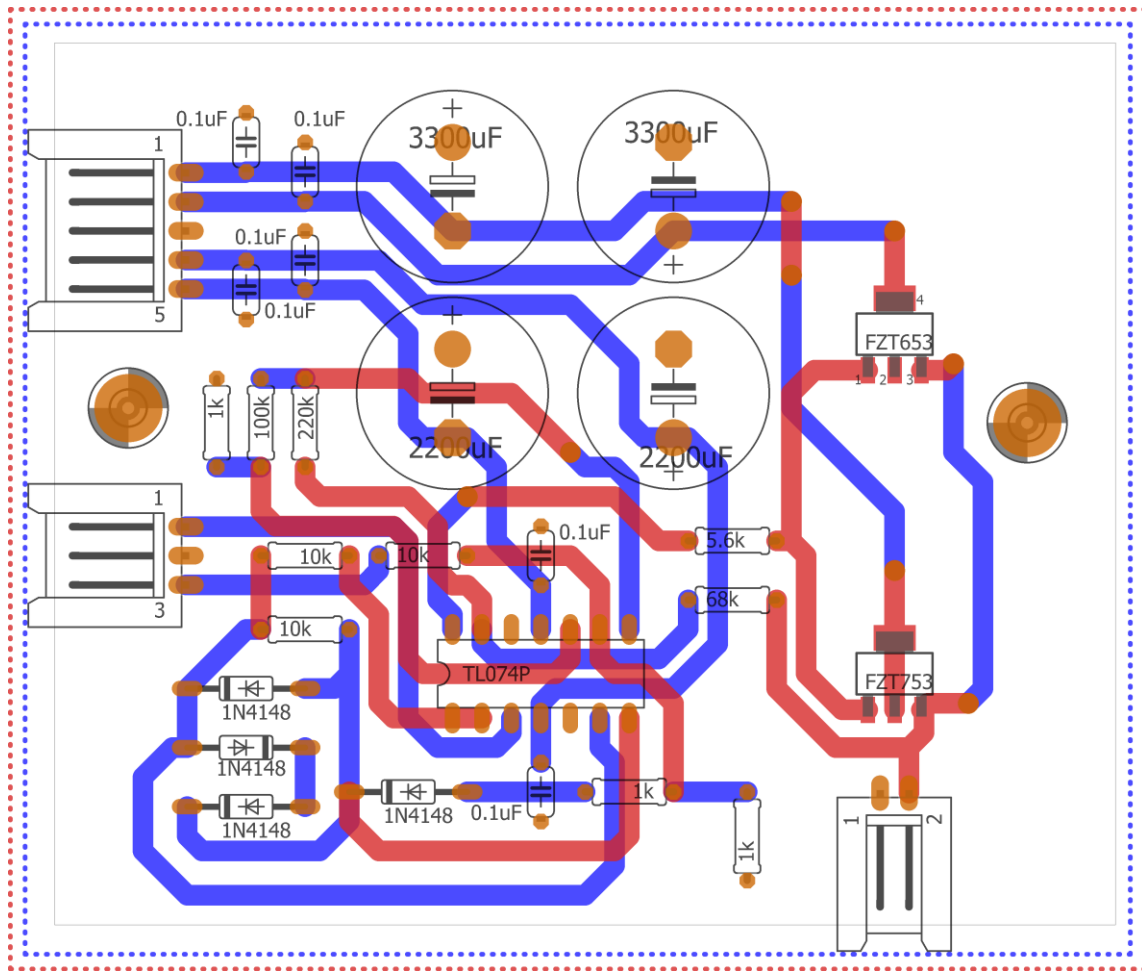


Figura 1.21. Diseño en Eagle del esquemático mostrado en la figura 1.20.

Una vez construido el circuito, se hizo un programa en LABVIEW para encontrar el tiempo óptimo que debe haber entre el pulso de 1[V] y la onda cuadrada que impulsa la armadura de la bobina de voz (Ver figura 1.19). El programa mide la velocidad en función del tiempo de espera entre el pulso inicial y la señal cuadrada, para distintas velocidades de impacto, obteniendo el gráfico de la figura 1.22.

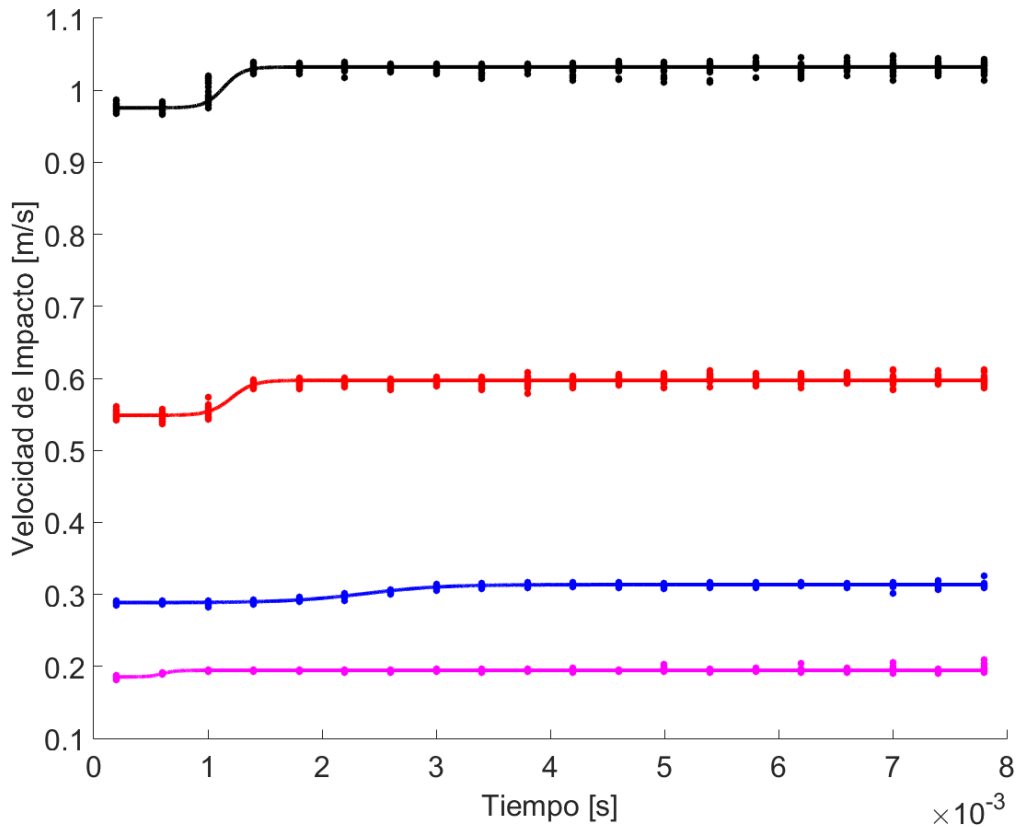


Figura 1.22. Gráfico de velocidad de impacto medida en función del tiempo de retardo de la señal de la figura 1.19. Los puntos son los datos experimentales, y las líneas continuas son ajustes. Los promedios de la velocidad en la sección constante de cada curva son: $0,1947 \pm 0,0060[m/s]$ (Magenta), $0,3133 \pm 0,0060[m/s]$ (Azul), $0,599 \pm 0,014[m/s]$ (Rojo) y $1,032 \pm 0,019[m/s]$ (Negro).

En el gráfico de la figura 1.22, para cada curva se observa que hay esencialmente dos valores de velocidad medidas, entre las cuales hay una transición de corta duración. Las velocidades más bajas se deben a que el tiempo de retardo es demasiado corto, y la viga de retención no alcanza a estar completamente levantada cuando la bobina de voz empieza a impulsar a la bola impactadora. Más allá de un cierto intervalo de tiempo se observa que las velocidades son mayores, y ya no cambian al aumentar el retardo. Esto corresponde

al caso en que la viga se encuentra completamente levantada al momento del disparo, y ya no interfiere con el movimiento de la bola. También se puede ver que la transición no es la misma para las distintas velocidades de disparo. Considerando las cuatro curvas, se fijó el tiempo de retardo a $3,8[ms]$, tiempo compatible con los cuatro casos para el cual la velocidad ya es estable. Con ese tiempo se modificaron los programas pertinentes.

1.3.5 Imágenes

A continuación, son mostradas algunas imágenes del trabajo realizado.

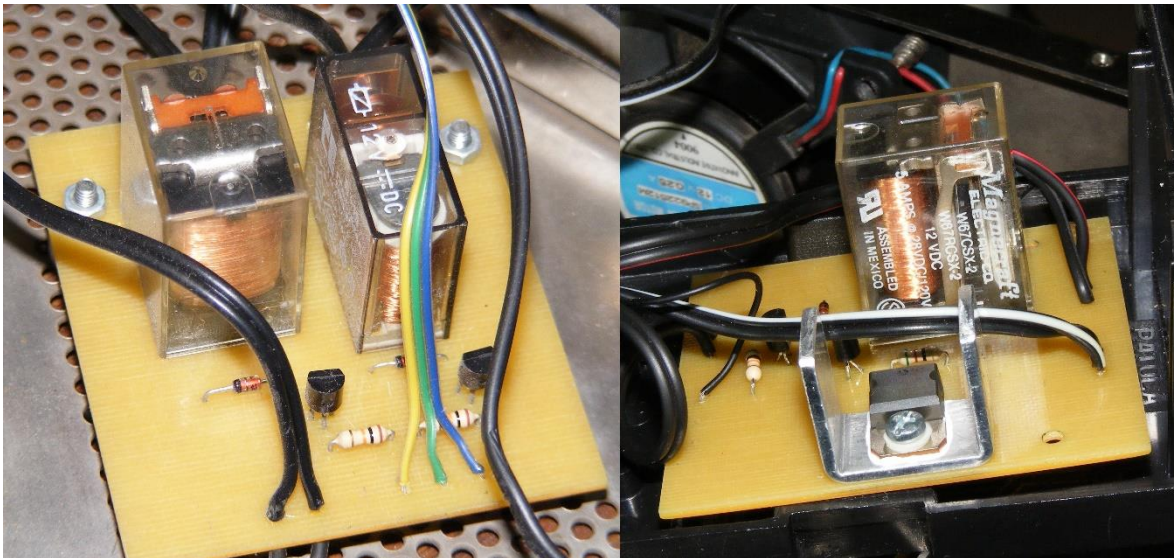


Figura 1.23. Circuitos armados y operando. A la izquierda el control de energía y a la derecha circuito para alimentar con un voltaje inverso en la bobina de voz.

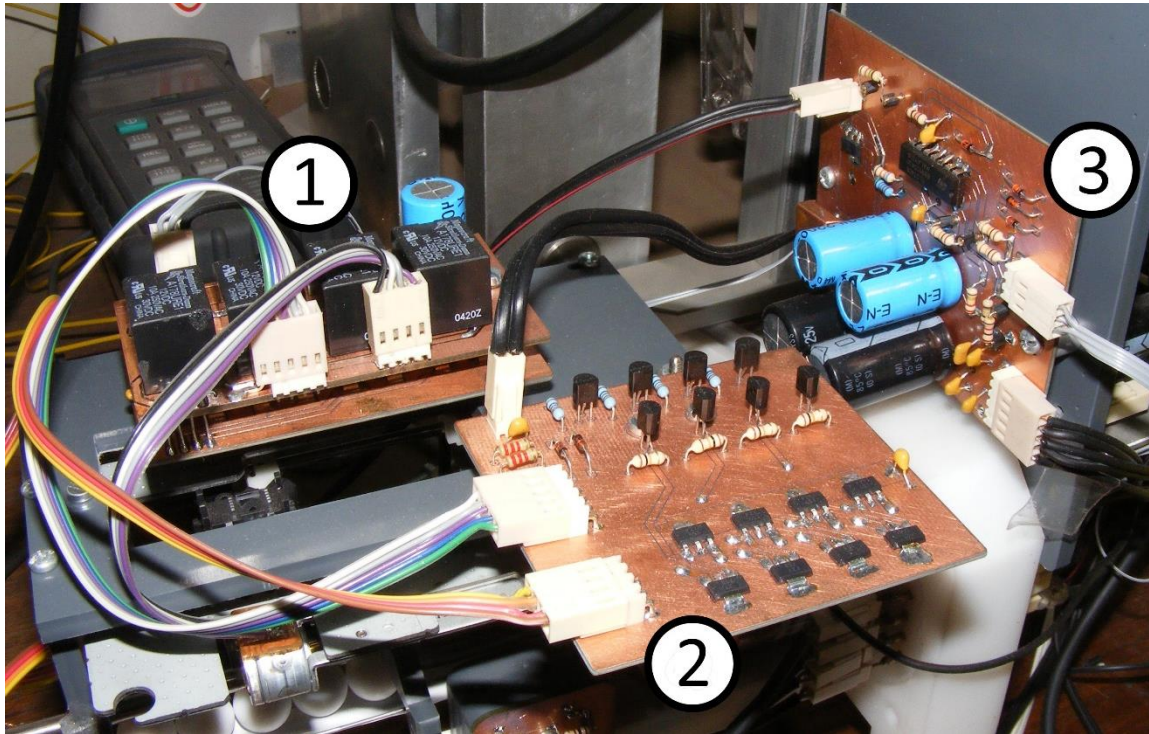


Figura 1.24. Circuitos armados y operando. Multiplexor (1), energía para el motor de precompresión (2) y circuito para el control de la viga de retención (3).

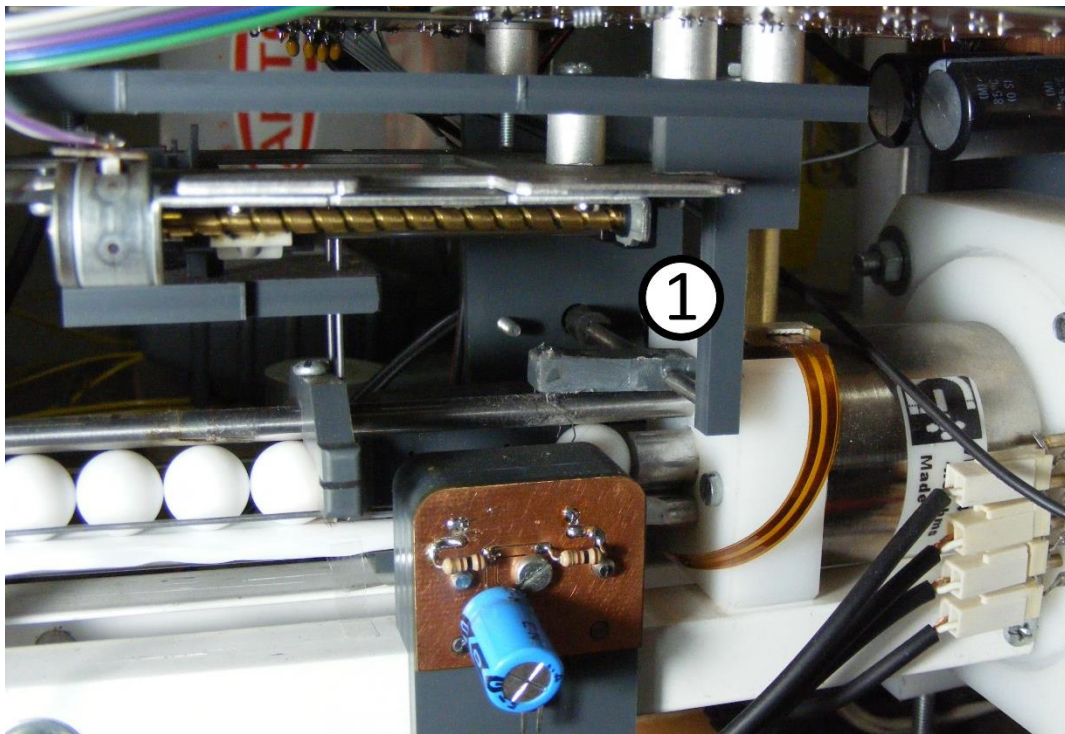


Figura 1.25. Sistema implementado para mantener la bola impactadora en su lugar (1).

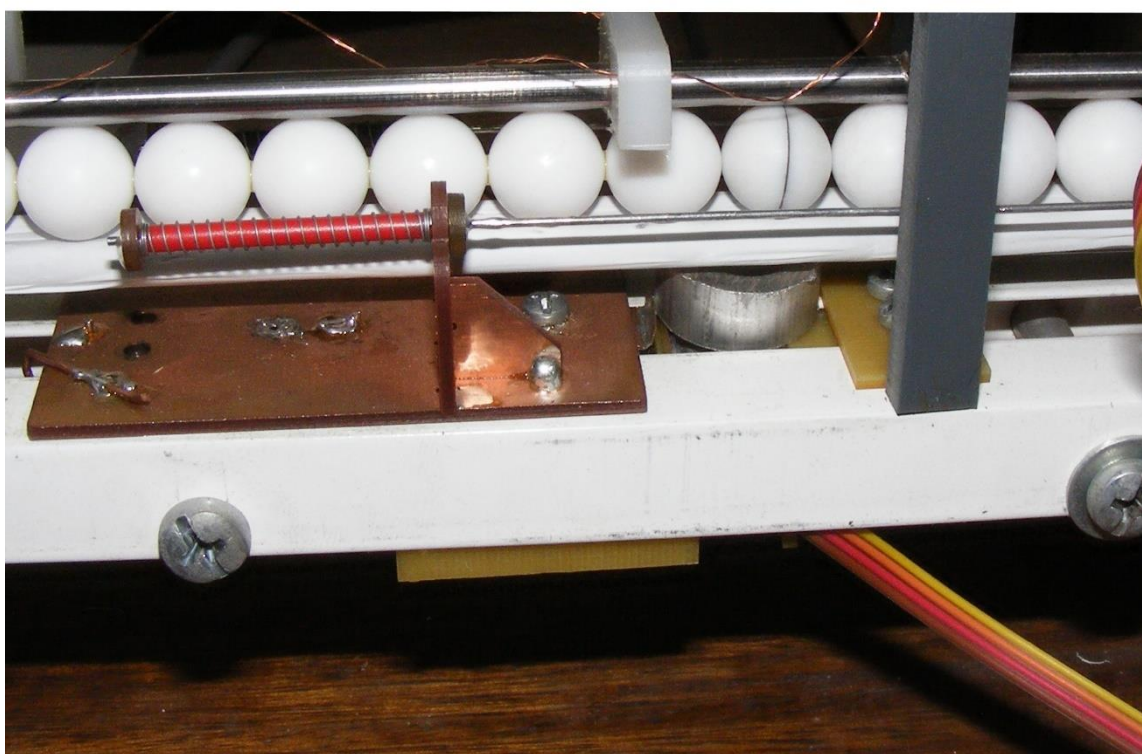
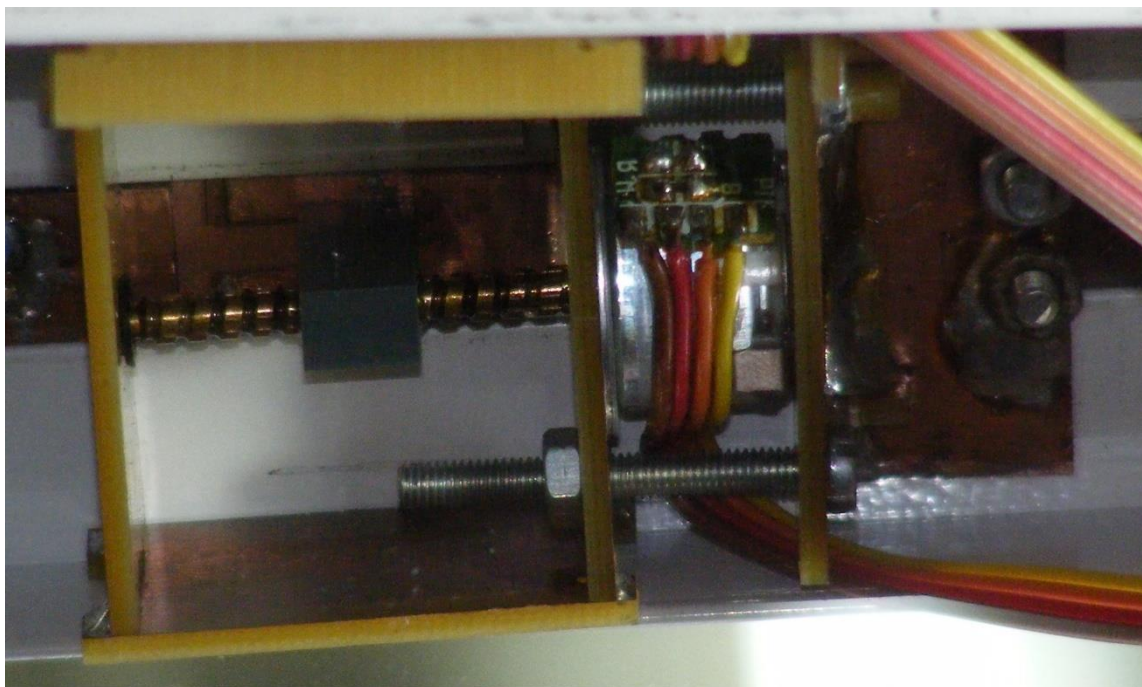


Figura 1.26. Sistema automatizado de precompresión. Arriba motor de pasos y el subsistema fabricado. Abajo sistema completo montado en el riel.

Capítulo 2: Procedimiento

2.1 Descripción de los materiales utilizados

Para el estudio de cadenas lineales de diferentes materiales se utilizaron esferas de acero, bronce y teflón. Como fluido intersticial en las diferentes cadenas se usó aceite de bomba de vacío DS19, aceite sintético de motor Edge SAE 0W-30, aceite de caja de velocidades Axle 80W-90, y aceite para cajas de velocidades Hypoy SAE 90.

Las características de los diferentes materiales y diferentes fluidos antes mencionados están resumidas en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Características de los aceites ocupados para el experimento, más especificaciones entregadas por los fabricantes de estos aceites son mostrados en el apéndice.

Aceite	Viscosidad [<i>cSt</i>] a 40°C	Viscosidad [<i>cSt</i>] a 100°C
DS19	55	8,1
Edge	73,21	12,18
Axle	140	14,34
Hypoy	185	17

Tabla 2.2. Características de los materiales utilizados para este experimento¹⁴.

Material	Densidad¹⁵ [kg/m^3]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson
Acero	7971,8	203	0,3
Bronce	8484,6	112	0,34
Teflón	2163,1	0,5	0,46

2.2 Preparación de cada experimento

Antes de insertar las esferas en el montaje para hacer las mediciones, éstas se limpiaban (salvo las bolas que tienen los sensores) con detergente y agua tibia, para luego ser enjuagadas con agua desmineralizada. Además, con aguarrás se limpiaban los rieles, además de la esfera y la semiesfera que contenían los sensores, en el área de contacto con las otras esferas.

¹⁴ Salvo la densidad, el módulo de Young y la razón de Poisson para el acero corresponden a valores calculados mediante un modelo desarrollado por el Profesor Lautaro Vergara, utilizando resultados de un experimento previo. Estos valores, que no fueron suministrados por el fabricante, están de acuerdo con los valores típicos para el acero inoxidable. Para los otros materiales, los valores son los que típicamente aparecen en la literatura.

¹⁵ Densidad calculada a partir de la masa mostrada en la tabla 1.1 y sabiendo que tienen un diámetro de 0,5 pulgadas.

Para los experimentos en caso húmedo, se colocaba una gota de aceite en los puntos de contacto entre las bolas, partiendo por la bola 8 y terminando en la penúltima bola de la cadena (bola 39 para largo 40, o bola 21 para largo 22). Se evitó humedecer con aceite las esferas (así como la semiesfera) que contenían los sensores, por la dificultad para limpiarlos y sobre todo prevenir que el aceite pudiera dañar las cerámicas.

El mayor problema (y por lo cual son complicadas las mediciones) es la fragmentación de la cadena (Hinch y Saint-Jean, 1999). Si bien se le da una pequeña inclinación al sistema, se cubre con teflón el riel y se usa un sistema de precompresión para disminuir el efecto de la fragmentación, éste persiste en las mediciones. Es por esto por lo que antes de cada medida tomada se hace una serie de golpeteos a la cadena con la bola impactadora a baja velocidad ($\sim 0,1[m/s]$) para compactar la cadena (Philippe y Bideau, 2002). Este procedimiento aumenta drásticamente el tiempo que demora cada experimento, pero demostró ser indispensable para obtener resultados válidos.

Para los distintos experimentos, se utilizaron las condiciones descritas en la tabla 2.3. La precompresión en el caso de la cadena de teflón tuvo que ser menor, ya que con una fuerza mayor de compresión la cadena se volvía inestable, rompiéndose con el paso de la onda solitaria. El número de golpeteos es encontrado de manera empírica basado en la calidad de los resultados obtenidos.

Cada vez que se montaba un experimento, era necesario relajar el sistema, y que este llegara a un estado estable para poder hacer las mediciones (que las bolas se asienten en el teflón o que el aceite se acomode en torno al punto de contacto

entre las esferas). Para esto se impacta la cadena 12000 veces con la bola impactadora a una velocidad cercana de $0,5[m/s]$, para luego hacer la corrida de mediciones correspondiente.

Tabla 2.3. Condiciones utilizadas para los experimentos, tanto para los casos secos como con aceite.

Material	Número de esferas de la cadena	Precompresión [N]	Número de golpeteos
Acero	40	0,132	40
Bronce	40	0,132	60
Teflón	40	0,012	60
Teflón	22	0,012	30

2.3 Procesamiento de los datos

Los datos son obtenidos utilizando LABVIEW, y estos son guardados en archivos binarios, para luego hacer el procesamiento de éstos utilizando MATLAB. Las señales que adquiere el computador son cortadas y ajustadas, mostrando uno de los resultados en las figuras 2.1 y 2.2.

Para cortar las señales, se ubica la posición del máximo de la señal de los sensores cerámicos y se cortan 5000 puntos anteriores y 10000 puntos posteriores (equivalentes a $10[ms]$ antes del máximo y $20[ms]$ después del máximo). La señal de los fotodetectores también es cortada hasta la posición del máximo del pulso de la figura 2.1, ya que todo lo que interesa en la señal de los fotodetectores para este trabajo está antes de ese momento.

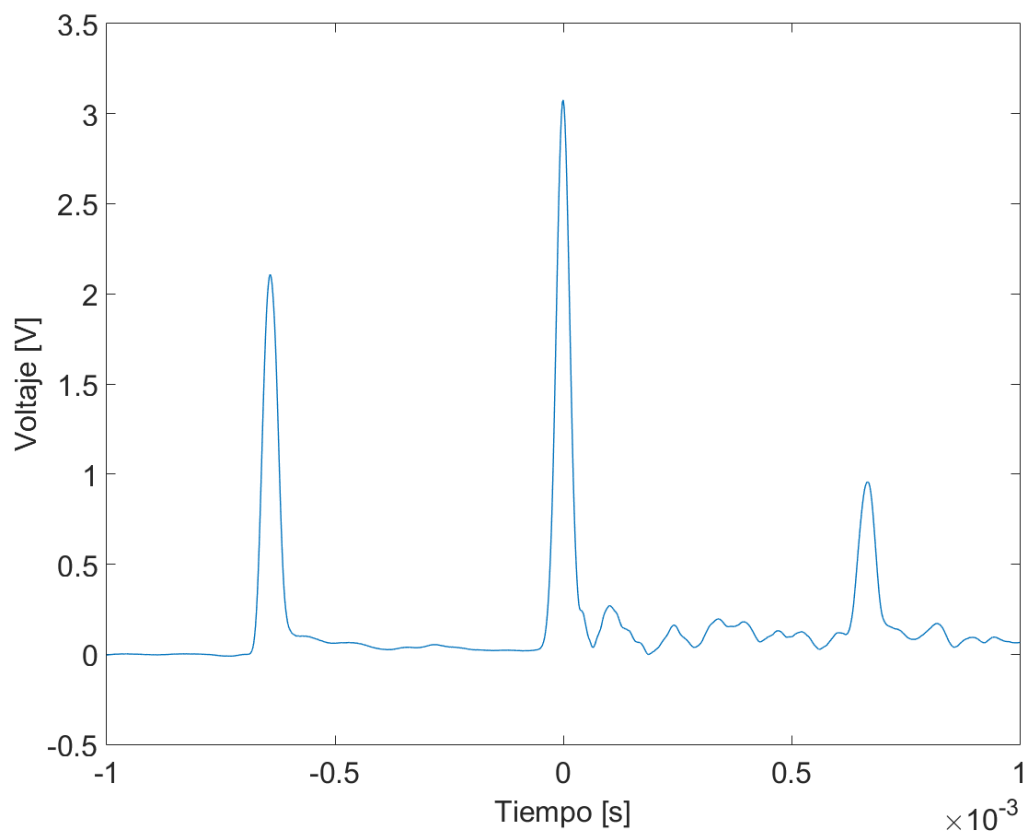


Figura 2.1. Datos obtenidos por los sensores piezoeléctricos y medidos por el computador, una vez que las señales son amplificadas, sumadas y filtradas. Cuando una onda solitaria viaja por la cadena pasa por el sensor de la bola 7 (pulso de la izquierda) llega al final de la cadena, donde está el otro sensor (pulso central) reflejándose la onda de vuelta por la cadena, volviendo a ser captada por el sensor de la bola 7 (pulso de la derecha).

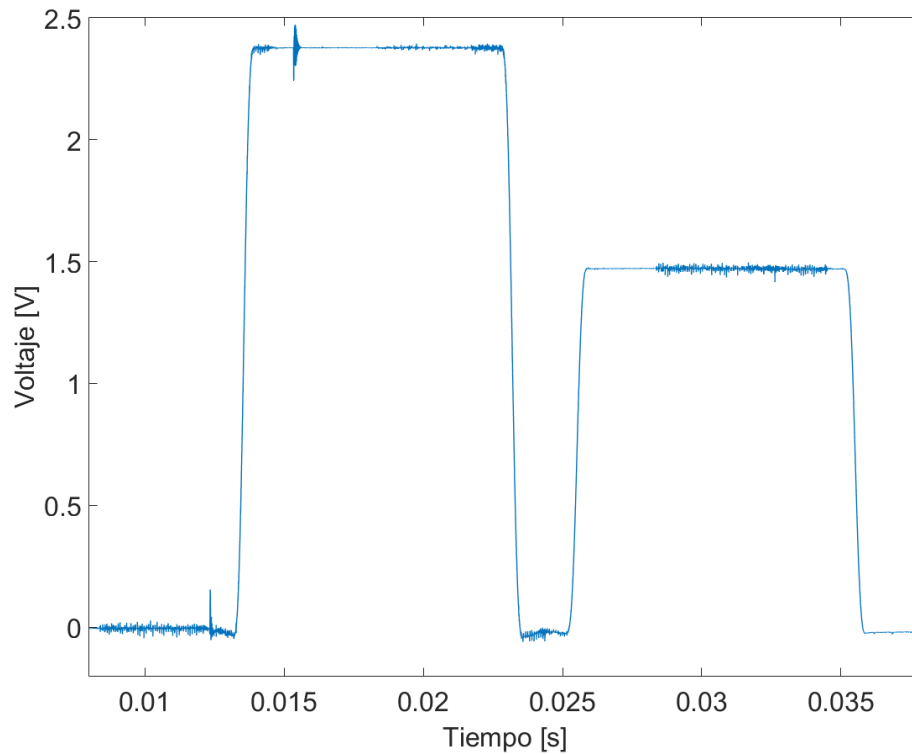


Figura 2.2. Datos obtenidos por las dos fotopuertas, y medidos por el computador, una vez que las señales son amplificadas, sumadas y filtradas.

Las señales obtenidas son suavizadas, obteniéndose las figuras 2.3 y 2.4.

El suavizado es usado para disminuir el ruido en las señales. A pesar de que debido al suavizado los pulsos decrecen en amplitud, lo que importa es la posición de los máximos para encontrar el tiempo de vuelo y no el valor del máximo, el cual casi no presenta cambios frente al suavizado.

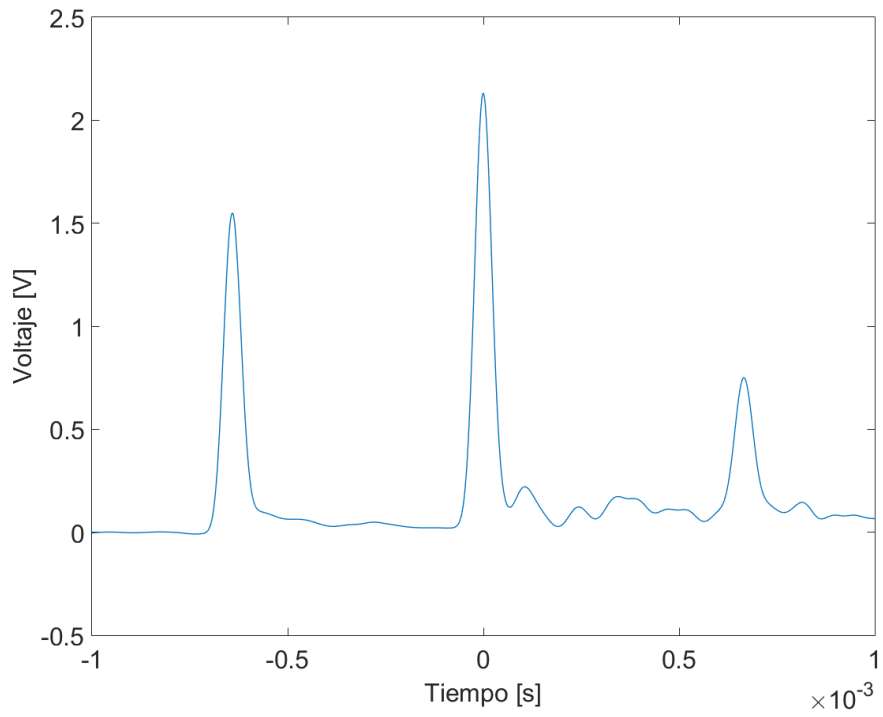


Figura 2.3. Datos de la señal de los sensores (Figura 2.1) suavizados.

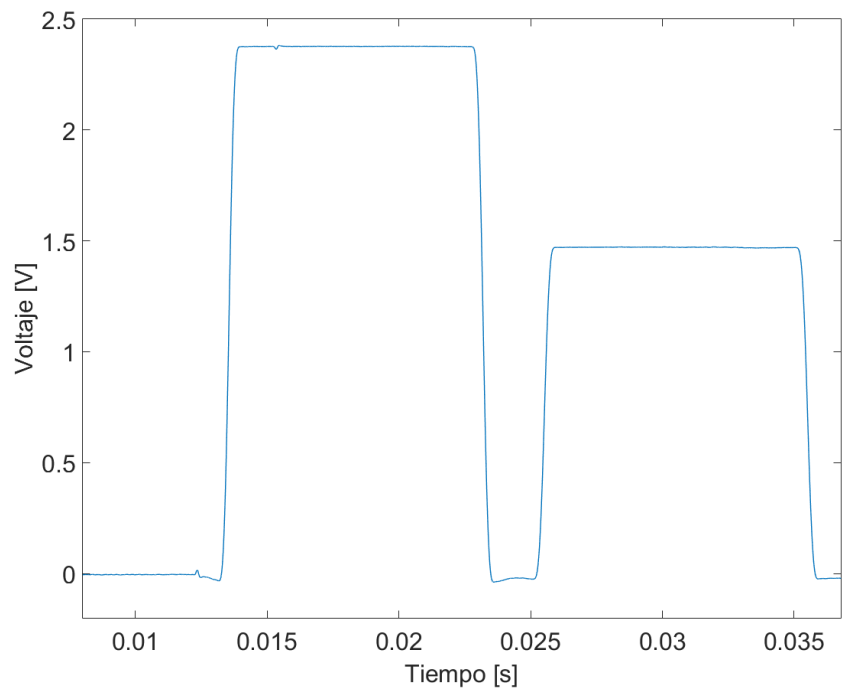


Figura 2.4. Datos de la señal de las fotopuertas (Figura 2.2) suavizados.

Para calcular el tiempo de vuelo a partir de la señal de la figura 2.3, se encuentra la posición del máximo de un pulso y se utilizan 10 puntos a cada lado desde esa posición, se le hace un ajuste cuadrático, y al ajuste se le encuentra el máximo (Ver figura 2.5), el cual no necesariamente coincide con el máximo de la serie de puntos. Para hacer el ajuste es necesario mover la serie de puntos seleccionada al origen de coordenadas, y luego la posición del máximo es devuelta a la posición original. Una vez encontrado el primer máximo, el pulso es borrado de la señal (borrando 300 puntos a cada lado), y buscando de nuevo el máximo de la nueva señal y repetir el procedimiento.

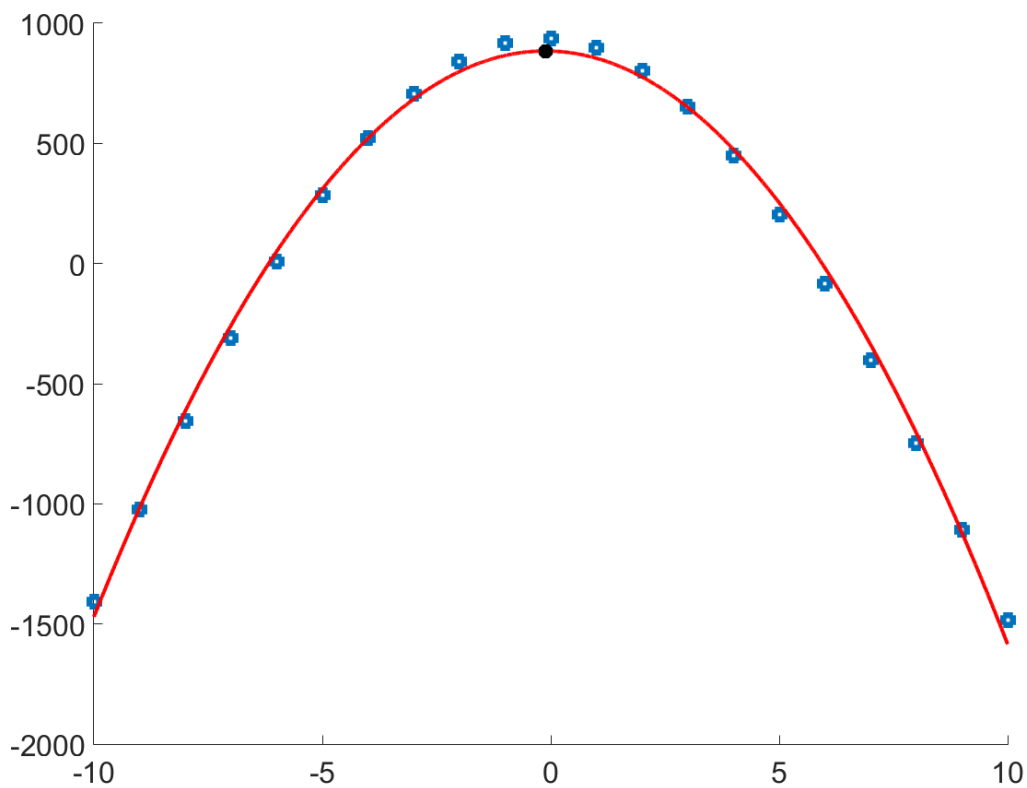


Figura 2.5 Procedimiento utilizado para encontrar los tiempos entre el primer y segundo pulso. Los puntos azules son los puntos experimentales, la línea roja es el ajuste cuadrático y el punto negro el máximo encontrado en el ajuste. Las unidades de los ejes son arbitrarias.

La diferencia de posición de los máximos es proporcional al tiempo de vuelo utilizando la frecuencia de muestreo de la señal ($500[kS/s]$).

Para calcular la velocidad de impacto, se invierte en el eje horizontal la señal de la figura 2.4 (utilizando el comando *flipud*), ya que la señal de la segunda fotopuerta es la importante (fotopuerta más cercana a la cadena). A la señal se le aplica un umbral a la mitad del valor máximo de la señal de la segunda fotopuerta (Ver figura 2.6). El máximo utilizado es el promedio de los puntos que comprenden la parte superior de la señal de la segunda fotopuerta. Además, debido a que las intensidades de los leds de las fotopuertas disminuyen con el paso del tiempo, es necesario a cada corrida de datos ajustar manualmente el máximo de la señal de la segunda fotopuerta.

Una vez aplicado el umbral, se calcula la derivada a esa nueva señal, con lo cual es posible encontrar los puntos medios de la señal de la segunda fotopuerta, utilizando el máximo y el mínimo¹⁶. Con esto último, es posible determinar el tiempo de bloqueo de la fotopuerta, ya que (al igual que el caso de los pulsos) la diferencia de las dos posiciones es proporcional al tiempo mediante la frecuencia de muestreo. Teniendo el tiempo de bloqueo y sabiendo que la esfera es de diámetro $12,7[mm]$ es posible calcular la velocidad a la que pasó la esfera por la fotopuerta.

¹⁶ En realidad, existen dos máximos y dos mínimos (como muestra la figura 2.6), pero el programa al utilizar el comando *max* y *min* arroja la posición del primer máximo y mínimo encontrado, que corresponden a los de la fotopuerta de interés.

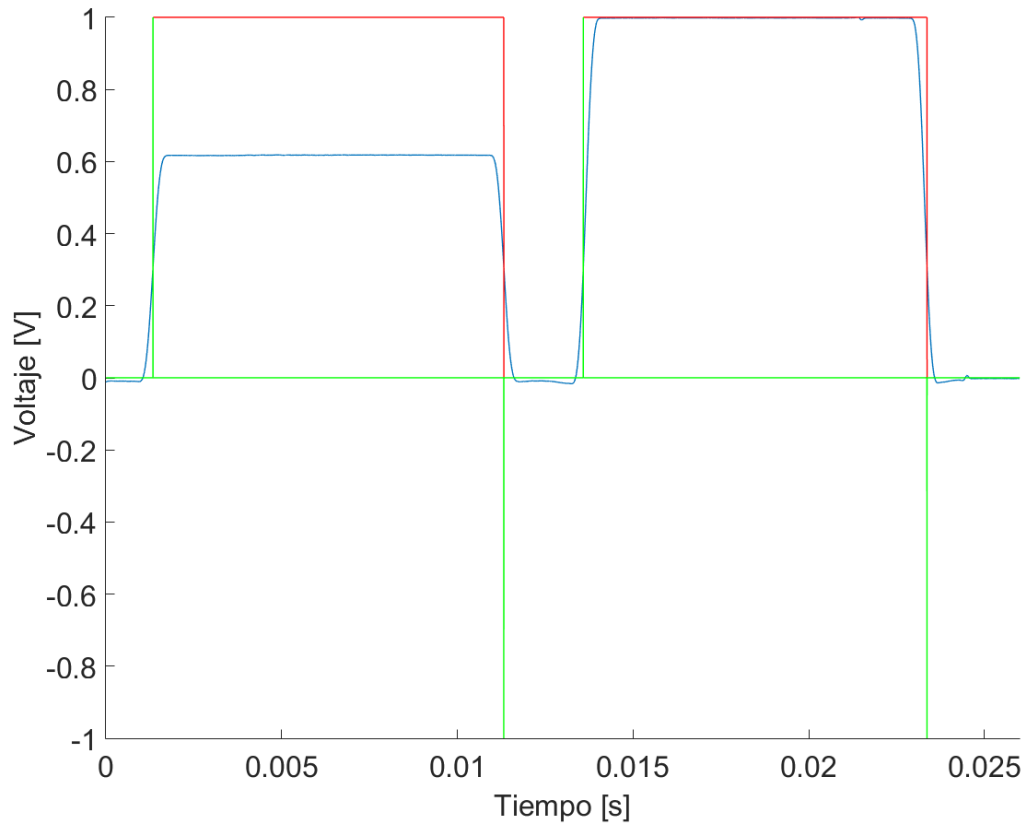


Figura 2.6. Procedimiento utilizado para calcular la velocidad de impacto. La señal azul es el dato experimental (suavizado y reversado). La curva roja corresponde a la señal luego de aplicar el umbral (ver el texto) y la curva verde corresponde a la derivada de la curva roja.

Capítulo 3: Resultados Experimentales

3.1 Tiempo de vuelo en función de la velocidad de impacto

Los resultados obtenidos son mostrados a continuación. En cada caso se hizo un ajuste de ley de potencia de la forma $y(x) = a \cdot x^b$ utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt, por lo que se muestran ambos parámetros para cada caso además del coeficiente de determinación, r^2 .

Para los casos con bronce y aceite, a bajas velocidades de impacto la atenuación era demasiada, por lo que el algoritmo fallaba al determinar el tiempo de vuelo en las mediciones, y es por lo que hay tanta dispersión en los datos en ese rango de mediciones (Ver figura 3.3).

En el caso de la cadena de teflón, también era demasiada la atenuación, por lo que se decidió disminuir el número de esferas que formaban la cadena de 40 a 22.

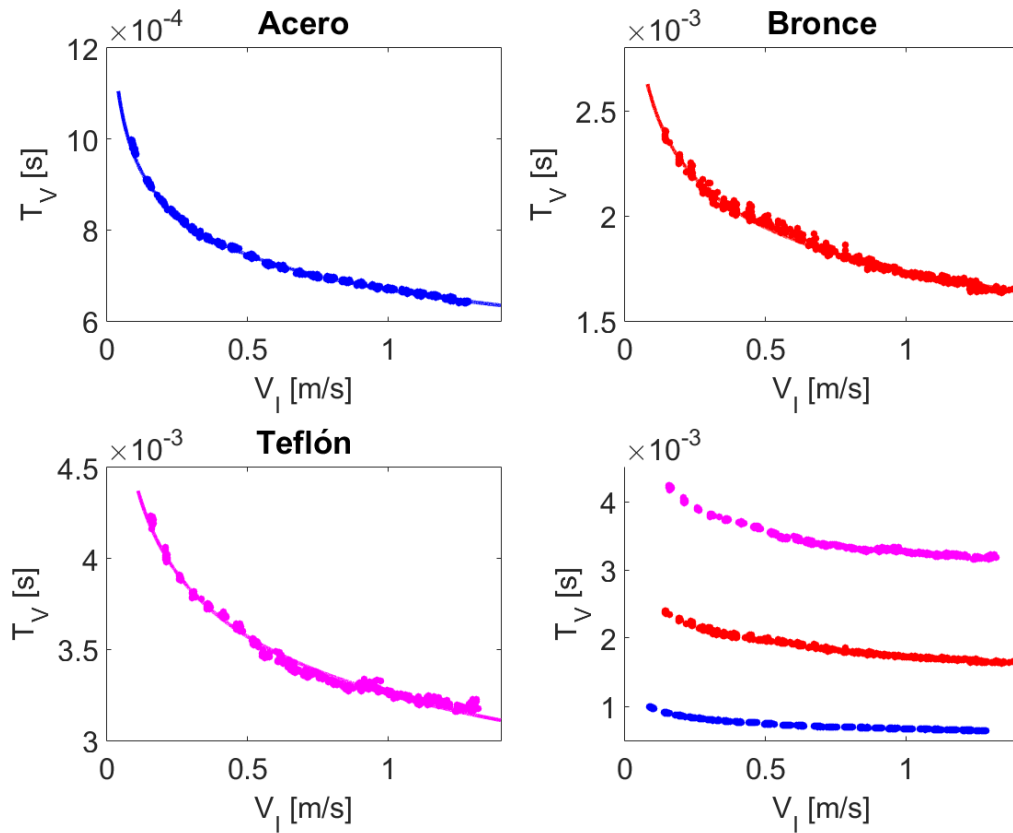


Figura 3.1. Tiempo de vuelo de la onda solitaria T_V en función de la velocidad de impacto V_I de la esfera impactadora, para una cadena compuesta de distintos materiales: Acero (Azul), Bronce (Rojo) y Teflón (Magenta) tanto datos experimentales (puntos) como su respectivo ajuste (curva) usando una ley de potencia. La cadena en los tres casos está formada por 40 esferas, más la esfera impactadora y la semiesfera del final.

Tabla 3.1. Parámetros obtenidos al ajustar una ley de potencia a los datos del gráfico de la figura 3.1.

Material	a	b	r^2
Acero	$(6,685 \pm 0,004) \cdot 10^{-4}$	$-0,1562 \pm 0,0004$	0,9981
Bronce	$(1,735 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,1644 \pm 0,0014$	0,9912
Teflón	$(3,254 \pm 0,004) \cdot 10^{-3}$	$-0,1338 \pm 0,0013$	0,9875

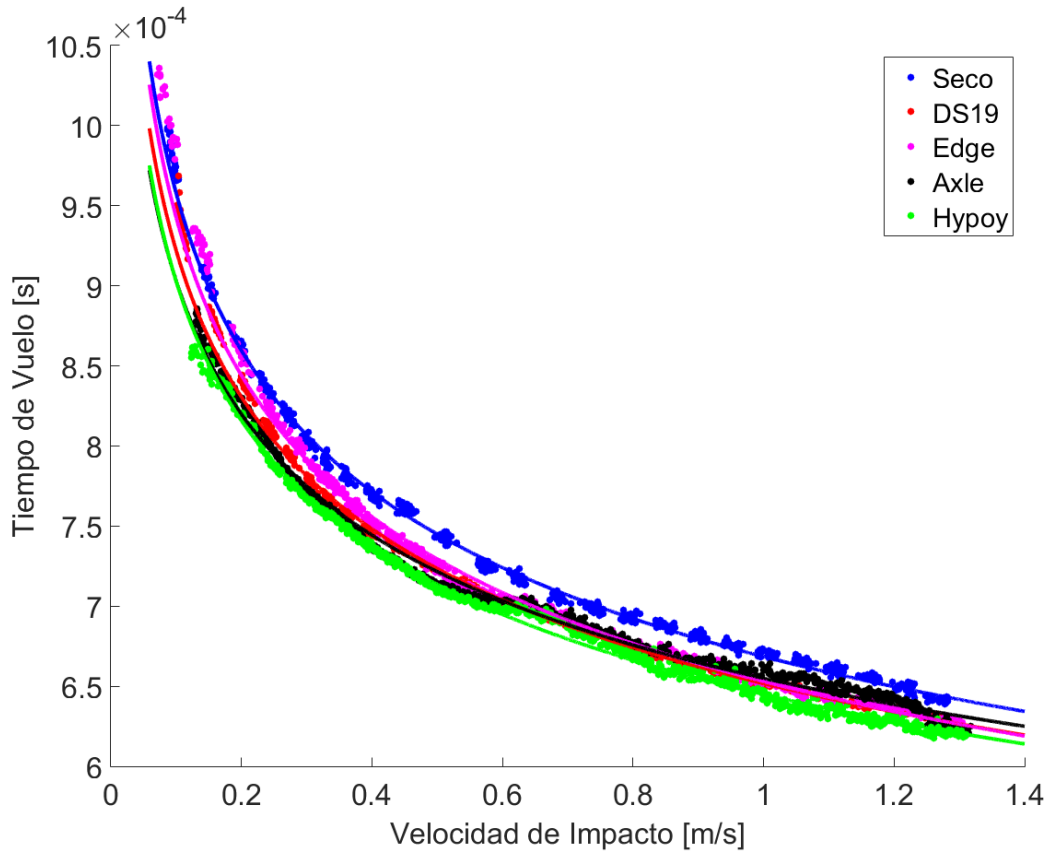


Figura 3.2. Tiempo de vuelo de la onda solitaria en función de la velocidad de impacto de la esfera impactadora para una cadena de esferas de acero, para distintos aceites en la región de contacto, y el caso seco; tanto datos experimentales (puntos) como sus respectivos ajustes (curva). Esto es para una cadena formada de 40 esferas más la esfera impactadora y la semiesfera al final.

Tabla 3.2. Parámetros obtenidos al ajustar una ley de potencia a los datos del gráfico de la figura 3.2.

Acero	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>²
Seco	$(6,685 \pm 0,004) \cdot 10^{-4}$	$-0,1562 \pm 0,0013$	0,9981
DS19	$(6,517 \pm 0,005) \cdot 10^{-4}$	$-0,1507 \pm 0,0004$	0,9965
Edge	$(6,527 \pm 0,007) \cdot 10^{-4}$	$-0,1595 \pm 0,0014$	0,9948
Axle	$(6,547 \pm 0,005) \cdot 10^{-4}$	$-0,1395 \pm 0,0013$	0,9910
Hypoy	$(6,449 \pm 0,005) \cdot 10^{-4}$	$-0,1461 \pm 0,0013$	0,9963

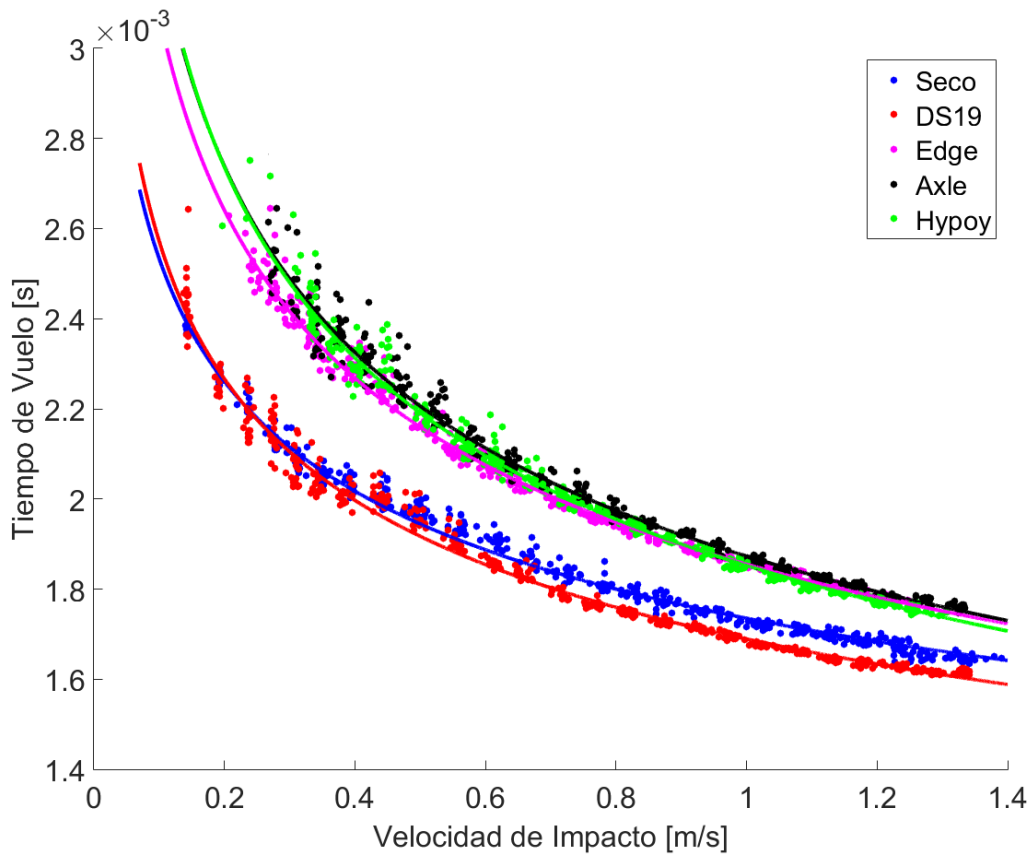


Figura 3.3. Tiempo de vuelo de la onda solitaria en función de la velocidad de impacto de la esfera impactadora para una cadena de esferas de bronce, para distintos aceites en la región de contacto, y el caso seco; tanto datos experimentales (puntos) como sus respectivos ajustes (curva). Esto es para una cadena formada de 40 esferas más la esfera impactadora y la semiesfera al final.

Tabla 3.3. Parámetros obtenidos al ajustar una ley de potencia a los datos del gráfico de la figura 3.3.

Bronce	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>²
Seco	$(1,735 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,1644 \pm 0,0013$	0,9912
DS19	$(1,689 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,1827 \pm 0,0004$	0,9941
Edge	$(1,855 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,2194 \pm 0,0014$	0,9954
Axle	$(1,873 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,2360 \pm 0,0013$	0,9942
Hypoy	$(1,852 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,2426 \pm 0,0013$	0,9936

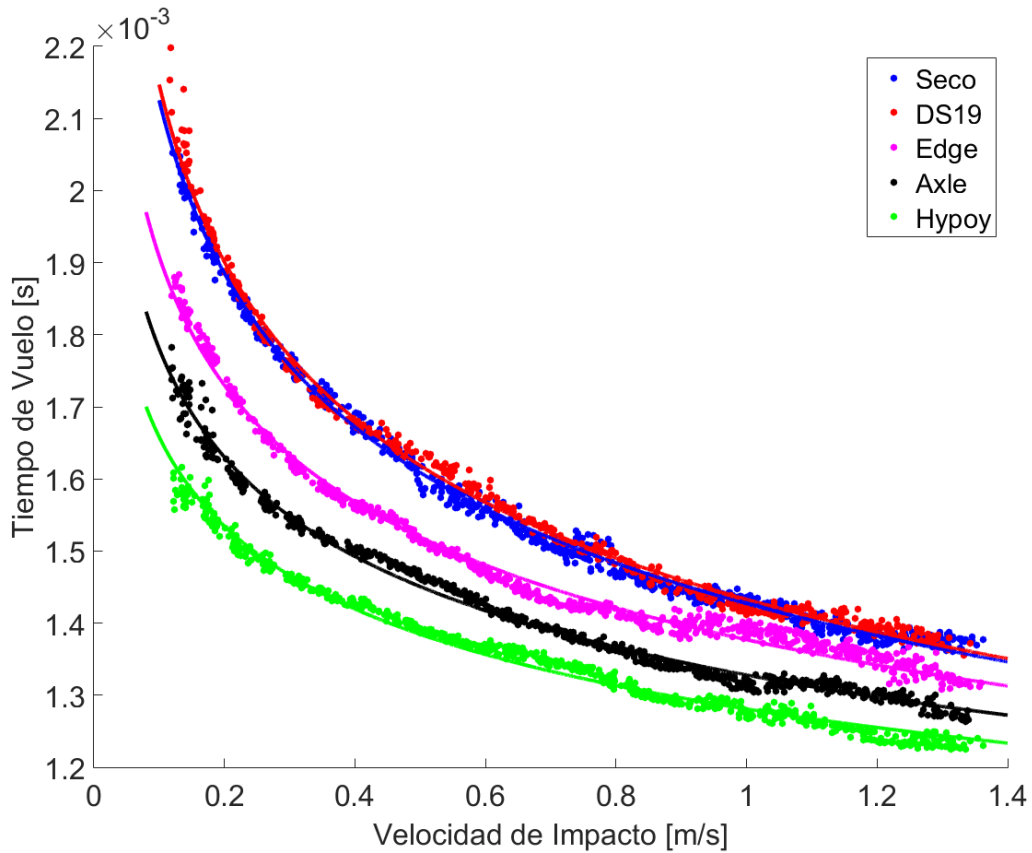


Figura 3.4. Tiempo de vuelo de la onda solitaria en función de la velocidad de impacto de la esfera impactadora para una cadena de esferas de teflón, para distintos aceites en la región de contacto, y el caso seco; tanto datos experimentales (puntos) como sus respectivos ajustes (curva). Esto es para una cadena formada de 22 esferas más la esfera impactadora y la semiesfera al final.

Tabla 3.4. Parámetros obtenidos al ajustar una ley de potencia a los datos del gráfico de la figura 3.4.

Teflón	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>²
Seco	$(1,427 \pm 0,001) \cdot 10^{-3}$	$-0,1730 \pm 0,0007$	0,9962
DS19	$(1,433 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	$-0,1756 \pm 0,0011$	0,9952
Edge	$(1,377 \pm 0,001) \cdot 10^{-3}$	$-0,1418 \pm 0,0010$	0,9910
Axle	$(1,328 \pm 0,001) \cdot 10^{-3}$	$-0,1274 \pm 0,0008$	0,9919
Hypoy	$(1,281 \pm 0,001) \cdot 10^{-3}$	$-0,1121 \pm 0,0010$	0,9864

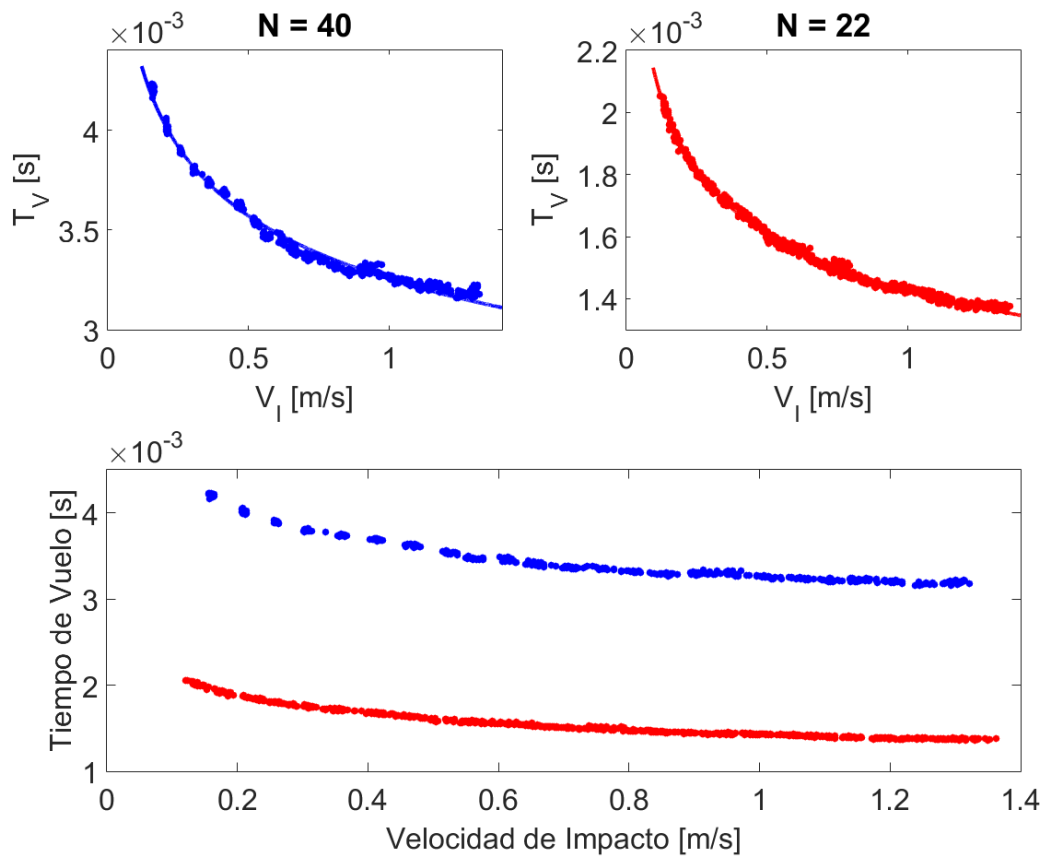


Figura 3.5. Tiempo de vuelo de la onda solitaria T_V en función de la velocidad de impacto V_I de la bola impactadora para una cadena de esferas de teflón de distinto largo, de 40 esferas (azul) y 22 esferas (roja), más la bola impactadora y la semiesfera del final.

Tabla 3.5. Parámetros obtenidos al ajustar una ley de potencia a los datos del gráfico de la figura 3.5.

N.º de Esferas	a	b	r^2
40	$(3,254 \pm 0,004) \cdot 10^{-4}$	$-0,1338 \pm 0,0013$	0,9875
22	$(1,427 \pm 0,001) \cdot 10^{-3}$	$-0,1730 \pm 0,0007$	0,9962

3.2 Otras Medidas

Cada vez que se hacía una corrida para relajar el sistema (12.000 disparos consecutivos sin golpeteo), se medía de todas maneras el tiempo de vuelo de la onda solitaria, algunas de esas mediciones son mostradas en las figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

En la figura 3.6 en particular, se observa como decae el tiempo de vuelo durante la primera hora de mediciones y después se estabiliza a un valor (aunque con una alta dispersión y una fluctuación lenta), mientras que en la figura 3.7 y 3.8 se observan fluctuaciones en el tiempo de vuelo. Para saber si estas fluctuaciones son producidas por las fluctuaciones de la velocidad de impacto, se hace una correlación entre la velocidad de impacto y el tiempo de vuelo. Para esto se remueve la tendencia lineal de ambas señales (utilizando el comando *detrend*) y luego se calcula la correlación normalizada¹⁷ entre ambas señales (utilizando el comando *xcorr*). Los resultados son mostrados en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 respectivamente.

¹⁷ Utilizando como argumento '*coeff*' en el comando *xcorr*, se normaliza la secuencia tal que una completa correlación a cero retraso es igual a 1.

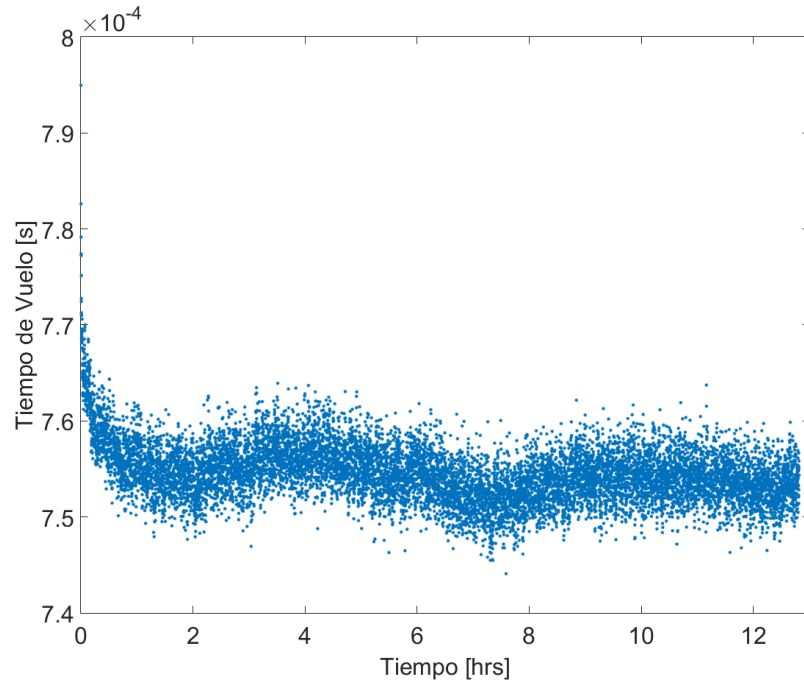


Figura 3.6. Tiempo de vuelo para una cadena de esferas secas de acero. Velocidad de impacto promedio: $0,496 \pm 0,015[m/s]$.

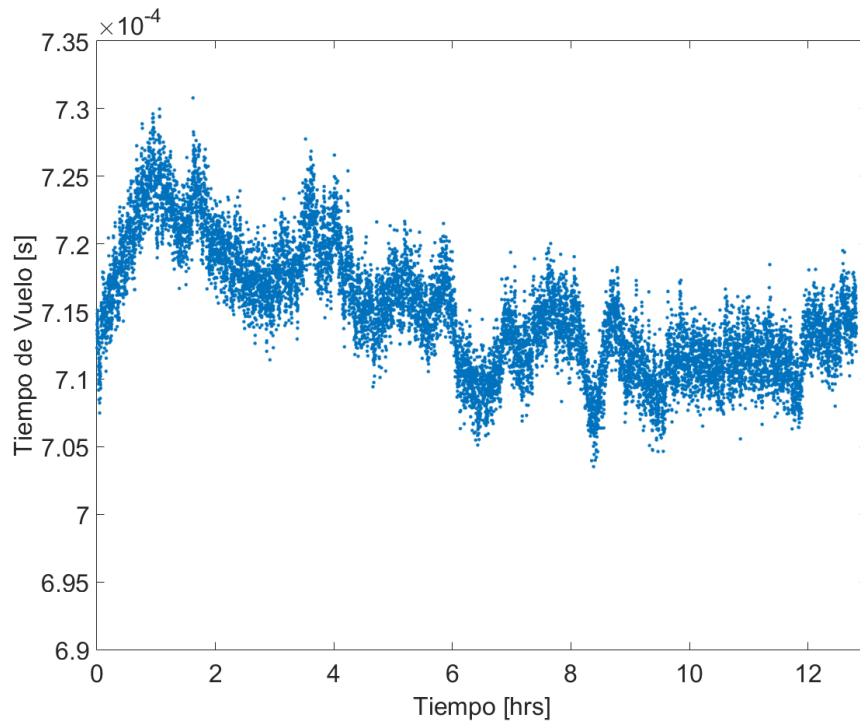


Figura 3.7. Tiempo de vuelo para una cadena de esferas de acero humedecidas con aceite Axle. Velocidad de impacto promedio $0,498 \pm 0,014[m/s]$.

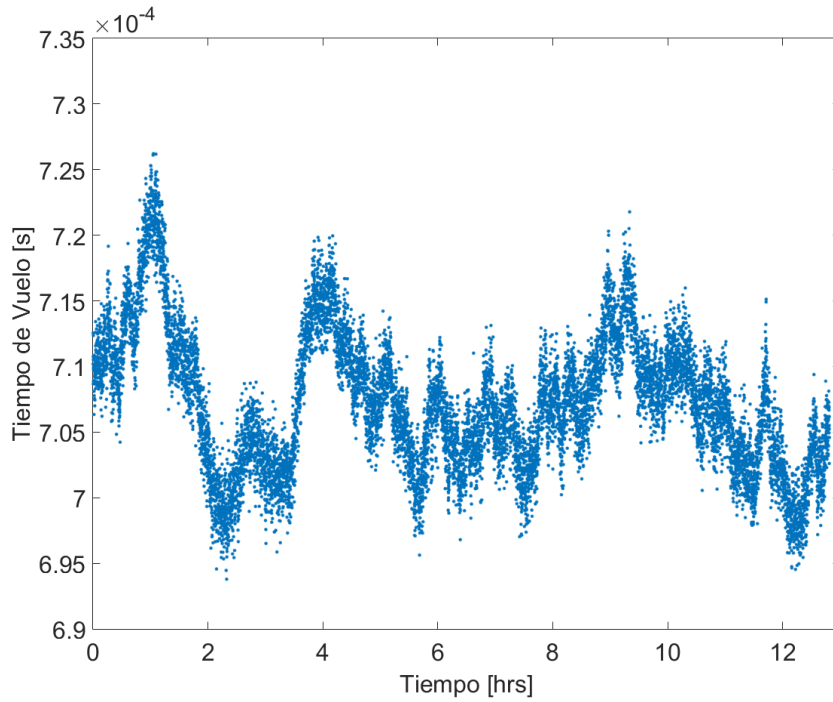


Figura 3.8. Tiempo de vuelo para una cadena de esferas de acero humedecidas con aceite Hypoy. Velocidad de impacto promedio $0,498 \pm 0,019[m/s]$.

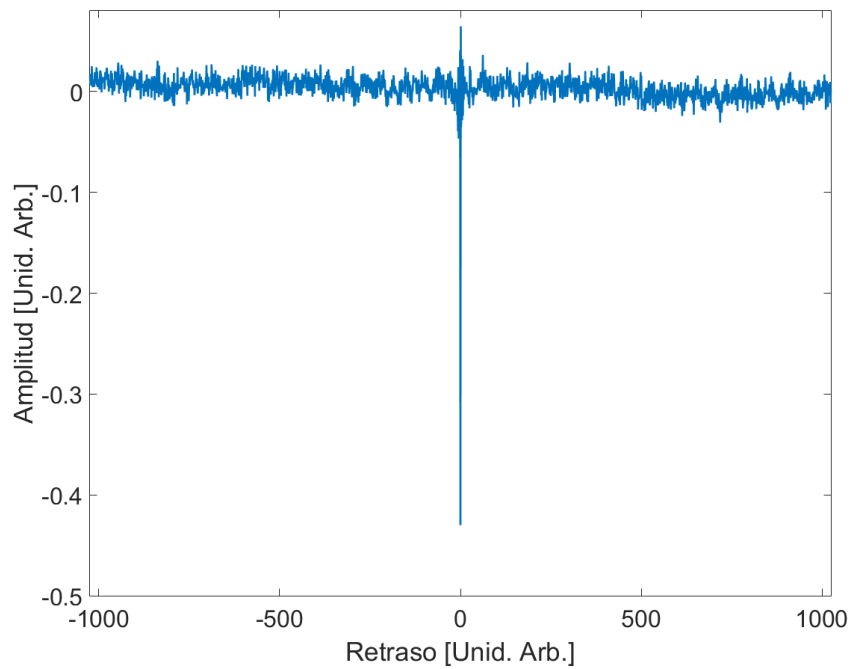


Figura 3.9. Correlación cruzada entre el tiempo de vuelo y la velocidad de impacto del caso mostrado en la figura 3.6.

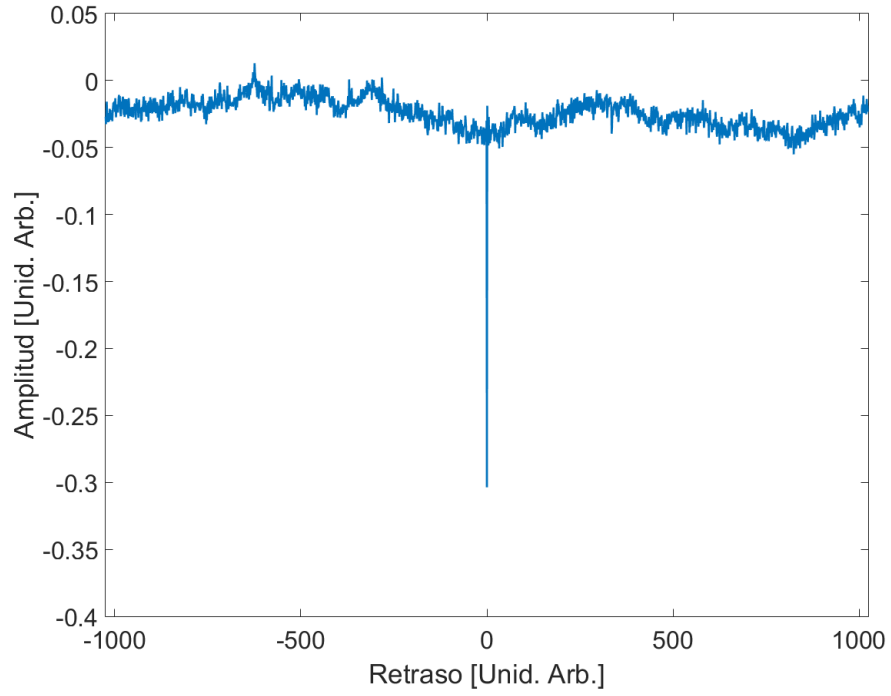


Figura 3.10. Correlación cruzada entre el tiempo de vuelo y la velocidad de impacto del caso mostrado en la figura 3.7.

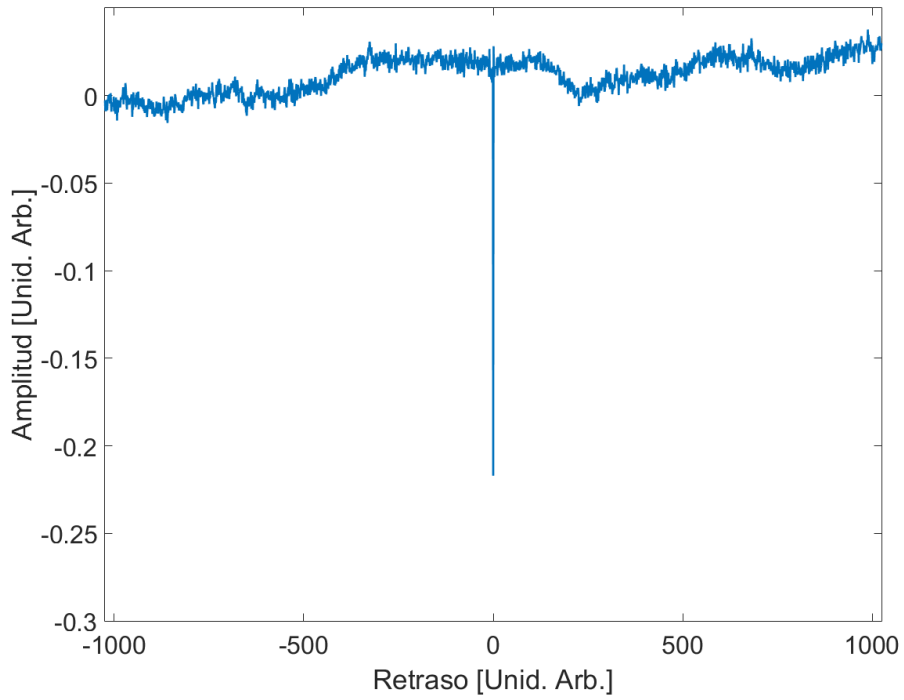


Figura 3.11. Correlación cruzada entre el tiempo de vuelo y la velocidad de impacto del caso mostrado en la figura 3.8.

En los tres casos (figuras 3.9, 3.10 y 3.11) se observa una correlación negativa a cero retraso, indicando que la velocidad de impacto y el tiempo de vuelo varían de forma opuesta, lo que es acertado, ya que al disminuir la velocidad de impacto, el tiempo de vuelo aumenta. Ahora bien, el valor de la amplitud de la correlación en el caso seco a cero retraso no es la unidad (0,430), y disminuye para los casos en aceite (0,304 y 0,217 respectivamente), lo que indica que las fluctuaciones en el tiempo de vuelo no son del todo producidos por las fluctuaciones en la velocidad de impacto. Una parte de las fluctuaciones en el tiempo de vuelo es generada por otro agente. El candidato más probable es la fragmentación de la cadena tras el paso de cada onda solitaria.

Capítulo 4: Análisis

Los resultados de los tiempos de vuelos en función de la velocidad de impacto en cada caso fueron bien ajustados por una ley de potencia, todos mostrados con el coeficiente de determinación muy cercanos a 1.0 (el coeficiente de determinación más bajo fue el caso de teflón con aceite hypoy con $r^2 = 0,9864$). Así, todos los resultados muestran que se cumple una relación entre el tiempo de vuelo, T_V , y la velocidad de impacto, V_I , de la forma

$$T_V(V_I) = a \cdot V_I^b \quad (5.1)$$

Para el caso de la cadena de acero, el tiempo de vuelo en una cadena húmeda disminuyó con respecto al seco. Además, el parámetro a no sufre mucha variación con respecto al parámetro b , mostrando en este caso que el parámetro b contiene las características reológicas. Aun así, las curvas no sufren muchos cambios por lo que la dinámica está gobernada por las características del material de las esferas.

En el caso del bronce, para los tres aceites más viscosos (Edge, Axle e Hypoy) el tiempo de vuelo aumentó con respecto al caso seco, mientras que en el caso del DS19 el tiempo de vuelo fue ligeramente menor para altas velocidades ($V_I > 0,6[m/s]$). Además, se observa para el caso de los aceites que aumentando la viscosidad aumenta el módulo del parámetro b .

Para el caso del teflón se observa que, para los aceites más viscosos el tiempo de vuelo disminuye con respecto al caso seco, mientras que para el DS19

no hay cambio. En este caso se observa una tendencia entre los aceites: a mayor viscosidad, la onda se propaga más rápido, es decir, el tiempo de vuelo es menor. Esto muestra que las características reológicas del fluido intersticial en una cadena de teflón, que es un material más blando que los otros dos estudiados, tienen una mayor influencia en la dinámica de propagación de ondas solitarias en la cadena que en los otros casos. Además, se observa que los parámetros también tienen una tendencia en función de la viscosidad, para mayor viscosidad el parámetro a y el módulo de b disminuyen.

Según los resultados, también es clara la dependencia de los tiempos de vuelo frente al tipo material o al largo de la cadena. Para los materiales (en caso seco) se puede observar una clara diferencia en el parámetro a , donde éste disminuye a medida que aumenta el módulo de Young. Como es de esperar, para el caso de las cadenas de distinto largo, se observa diferencias en ambos parámetros, donde al aumentar el número de esferas de la cadena el parámetro a aumenta, mientras que el módulo de b disminuye.

Por otra parte, el estudio del tiempo de vuelo sin golpeteos muestra que existe una correlación entre las fluctuaciones de la velocidad y las fluctuaciones del tiempo de vuelo, aunque las primeras no explican completamente estas últimas. En efecto, el coeficiente de correlación no es 1.0, lo cual implica que existen otros factores que también estarían incidiendo en las fluctuaciones del tiempo de vuelo. Una opción bastante probable sería la fragmentación de la cadena frente al paso de la onda solitaria, junto con irregularidades en el riel. Además, la correlación es menor para cadenas con aceite, lo cual se podría explicar por el hecho de que al separarse las esferas el aceite fluye hacia el espacio generado, haciendo más difícil

compactar la cadena nuevamente. Esto es corroborado por el hecho de que el coeficiente de correlación disminuye al aumentar la viscosidad del fluido. Los resultados muestran que estas fluctuaciones en el tiempo de vuelo dependen del material de las esferas y del fluido intersticial, por lo que estas mediciones podrían servir para complementar la caracterización tanto de las propiedades elásticas del material como de las propiedades reológicas del fluido intersticial.

Conclusión

Para la realización del presente trabajo, fue necesario realizar una serie de mejoras en el dispositivo experimental. Estas mejoras son:

- a. Control de energía: para evitar daños al dispositivo frente a cortes del suministro de energía.
- b. Voltaje inverso a la bobina de voz: para evitar daños a la bobina de voz frente a problemas en la reposición de bola impactadora.
- c. Automatización del sistema de precompresión: con el fin de controlar de manera más precisa la precompresión, y en un futuro poder estudiar la dinámica de una cadena de esferas frente a distinta precompresión inicial.
- d. Viga de retención de la bola impactadora: para disminuir las fluctuaciones en la velocidad de impacto y eliminar la necesidad de ajustar el dispositivo de retención en cada experimento.

Se realizaron mediciones de tiempo de vuelo de una onda solitaria que viaja por una cadena lineal de esferas en función de la velocidad de impacto de una esfera impactadora del mismo material. Esto para cadenas compuestas por esferas de acero, bronce y teflón, y en caso seco y con fluido intersticial en sus puntos de contacto (DS19, Edge, Axle e Hypoy). En todos los casos, las curvas obtenidas son bien representadas por una ley de potencia ($r^2 \geq 0,9864$). También se observa que los parámetros de ajustes cambian dependiendo de las características del material, fluido intersticial y largo de la cadena.

También se realizaron mediciones de tiempo de vuelo de una onda solitaria que viaja por una cadena lineal de esferas bajo consecutivos impactos a una velocidad aproximadamente constante. Se observa que existen fluctuaciones en el tiempo de vuelo que no están correlacionadas con las fluctuaciones de la velocidad de impacto. También se observa una pérdida sistemática de correlación con el aumento de la viscosidad del fluido intersticial.

Se espera que en un futuro se puedan hacer más mediciones del mismo experimento, para poder incluir en las incertezas de los parámetros encontrados los errores aleatorios propios del experimento (las incertezas mostradas son todas provenientes del análisis de datos), y con esto pensar en un dispositivo que sea capaz de poder caracterizar el fluido intersticial y/o el material del que está conformado la cadena. Además, se espera que este montaje experimental sirva para obtener datos orientados a mejorar el modelo Hertz-viscoelástico existente, que describe la dinámica del punto de contacto entre dos esferas. Y, por último, poder estudiar más a fondo el fenómeno de fragmentación de un arreglo unidimensional de esferas frente al paso de una onda solitaria.

Referencias Bibliográficas

Cambou, B. (Ed.). (1998). Behaviour of granular materials. *Heidelberg: Springer*.

Coste, C., Falcon, E., & Fauve, S. (1997). Solitary waves in a chain of beads under Hertz contact. *Physical Review E*, 56(5), 6104.

Daraio, C., Nesterenko, V. F., Herbold, E. B., & Jin, S. (2005). Strongly nonlinear waves in a chain of Teflon beads. *Physical Review E*, 72(1), 016603.

DC Mini-Motors M25E-4 Series (3) Mitsumi. Disponible en:

<https://www.digchip.com/data/304/304-01407-0-M25E-4-3-.pdf>

Device Specifications NI 6251 National Instruments 2016. Disponible en:

<http://www.ni.com/pdf/manuals/375213c.pdf>

Edge 0W-30 A3/B4 Product Data Castrol 2016. Disponible en:

[https://msdspds.castrol.com/bpqlis/FusionPDS.nsf/Files/66FB02D7403DC08780257FA7004CEF87/\\$File/BPXE-A9TNQ9.pdf](https://msdspds.castrol.com/bpqlis/FusionPDS.nsf/Files/66FB02D7403DC08780257FA7004CEF87/$File/BPXE-A9TNQ9.pdf)

Engineering ToolBox, (2007). *Poisson's Ratio for Metals*. Disponible en:

https://www.engineeringtoolbox.com/metals-poissons-ratio-d_1268.html

Engineering ToolBox, (2008). *Polymers - Physical Properties*. Disponible en:

https://www.engineeringtoolbox.com/polymer-properties-d_1222.html

Engineering ToolBox, (2008). *Young's Modulus - Tensile and Yield Strength for common Materials*. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/young-](https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html)

[modulus-d_417.html](https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html)

Geeplus VM4032 & VM4040 2017. Disponible

en: https://www.geeplus.biz/FTPROOT/Voice_Coil_motor_VM4032.pdf

- Goldobin, D. S., Susloparov, E. A., Pimenova, A. V., & Brilliantov, N. V. (2015). Collision of viscoelastic bodies: Rigorous derivation of dissipative force. *The European Physical Journal E*, 38(6), 55.
- Herbold, E. B., Nesterenko, V. F., & Daraio, C. (2006, July). Influence of controlled viscous dissipation on the propagation of strongly nonlinear waves in stainless steel based phononic crystals. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 845, No. 1, pp. 1523-1526). AIP.
- Herrmann, F., & Seitz, M. (1982). How does the ball-chain work? *Am. J. Phys*, 50(11), 977-981.
- Hill, J. M., & Selvadurai, A. P. (2005). Mathematics and mechanics of granular materials. In *Mathematics and Mechanics of Granular Materials* (pp. 1-9). Springer, Dordrecht.
- Hinch, E. J., & Saint-Jean, S. (1999, September). The fragmentation of a line of balls by an impact. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 455, No. 1989, pp. 3201-3220). The Royal Society.
- HS452 HS652 Rotary Vane Pumps Model 949-9360 Model 949-9365 Agilent Technologies 2009. Disponible en:
https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/pdf/manuals/hs452-hs652%20rotary%20vane%20pumps.pdf
- Job, S., Melo, F., Sokolow, A., & Sen, S. (2005). How Hertzian solitary waves interact with boundaries in a 1D granular medium. *Physical Review Letters*, 94(17), 178002.

Job, S., Santibanez, F., Tapia, F., & Melo, F. (2008). Nonlinear waves in dry and wet Hertzian granular chains. *Ultrasonics*, 48(6-7), 506-514.

Johnson, K. L., & Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge university press.

Labbé, R., Olivares, I. & Vergara, L. (2017). Time-of-flight of solitary waves in dry and wet chains of beads: experimental results. *arXiv preprint arXiv:1701.07133*.

Lazaridi, A. N., & Nesterenko, V. F. (1985). Observation of a new type of solitary waves in a one-dimensional granular medium. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 26(3), 405-408.

Nesterenko, V. F. (1983). Propagation of nonlinear compression pulses in granular media. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 24(5), 733-743.

Ni 6703/6704 Specifications National Instruments 2012. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372675b.pdf>

Ni, X., Rizzo, P., Yang, J., Katri, D., & Daraio, C. (2012). Monitoring the hydration of cement using highly nonlinear solitary waves. *NDT & E International*, 52, 76-85.

Olivares, I., Riveros, G., Manriquez, C., Labbé, R., & Vergara, L. (2017). Highly nonlinear solitary wave velocity measurement with a modified Michelson interferometer. *Optica Applicata*, 47(2).

Philippe, P., & Bideau, D. (2002). Compaction dynamics of a granular medium under vertical tapping. *EPL (Europhysics Letters)*, 60(5), 677.

Piezo Systems, Inc. 2011. Disponible en: <http://www.piezo.com/catalog8.pdf>

Professional Plastics. *Mechanical Properties of Plastic Materials*. Disponible en: <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/MechanicalPropertiesofPlastics.pdf>

Sadovskaya, O., & Sadovskii, V. (2012). *Mathematical modeling in mechanics of granular materials* (Vol. 21). Springer Science & Business Media. Safety Data

Sheet Castrol 2017. Disponible en:

[https://msdspds.castrol.com/ussds/amersdsf.nsf/Files/0E3152206A9AD27B802580E30057FBE6/\\$File/11218507.pdf](https://msdspds.castrol.com/ussds/amersdsf.nsf/Files/0E3152206A9AD27B802580E30057FBE6/$File/11218507.pdf)

Safety Data Sheet Castrol 2008. Disponible en:

[https://msdspds.castrol.com/ussds/amersdsf.nsf/Files/CA4577F72912FE6F802578F3006DC37B/\\$File/043440Protector%20Series%20Axle%20Oil%20Hypoy%2090.pdf](https://msdspds.castrol.com/ussds/amersdsf.nsf/Files/CA4577F72912FE6F802578F3006DC37B/$File/043440Protector%20Series%20Axle%20Oil%20Hypoy%2090.pdf)

SOT223 NPN Silicon Planar High Performance Transistor FZT653. 1995.

Disponible en: <https://datasheet.octopart.com/FZT653-Diodes-Inc.-datasheet-8330547.pdf>

SOT223 PNP Silicon Planar Medium Power Transistor FZT753. 1996. Disponible

en: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A100/FZT753TA_ZET.pdf

Yang, J., Silvestro, C., Khatri, D., De Nardo, L., & Daraio, C. (2011). Interaction of highly nonlinear solitary waves with linear elastic media. *Physical Review E*, 83(4), 046606.

Anexo

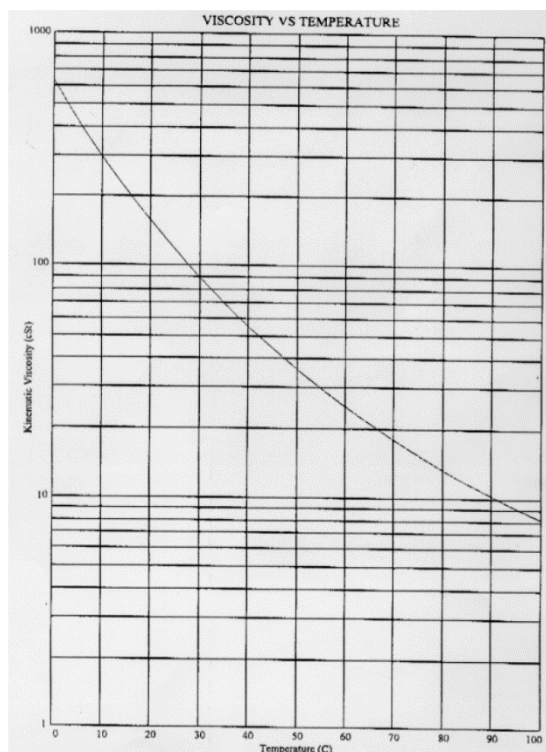
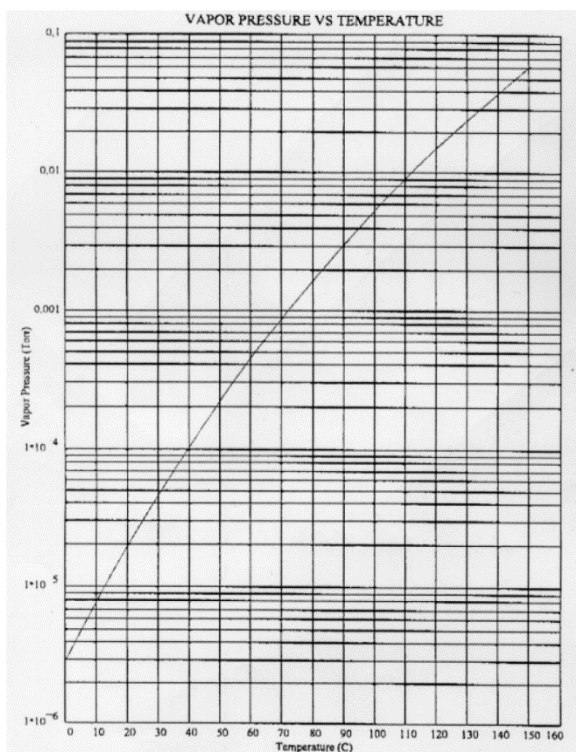
Las especificaciones técnicas mostradas a continuación son las proporcionadas por los fabricantes en las hojas técnicas o catálogos respectivos.

Aceites

DS19

Características Típicas del aceite DS19

Property	Unit of Measure	Rotary Vane Fluid DS19 Type
Vapor pressure @ 25°C	Torr	$1 \cdot 10^{-5}$
Boiling point @ 0,01 torr	°C (°F)	112 (233)
Viscosity @ 40°C	cSt (SUS)	55 (258)
Viscosity @ 100°C	cSt (SUS)	8,1 (52,7)
Pour point	°C (°F)	-15 (5)
Flash point	°C (°F)	213 (415)
Fire point	°C (°F)	244 (472)
Density @ 25 °C	g/ml	0,87



Características del aceite DS19.

Edge

Características típicas del aceite Edge.

Name	Method	Units	Typical Values
Density @ 15°C, Relative	ASTM D4052	g/ml	0,8416
Appearance	Visual	-	Clear & Bright
Viscosity, Kinematic 100°C	ASTM D445	mm^2/s	12,18
Viscosity, CCS -35°C (0W)	ASTM D5293	mPa·s (cP)	5880
Viscosity, MRV / Yield Stress -40°C (0W)	ASTM D4684	mPa·s (cP)	20400
Noack Volatility	CEC L-40-A-93	%Loss	8,3
Viscosity, HTHS 150°C	ASTM D4683	cP	3,5
Gelation Index	ASTM D5133	-	6
Viscosity, Kinematic 40°C	ASTM D445	mm^2/s	73,21
Viscosity Index	ASTM D2270	None	164
Pour Point	ASTM D97	°C	-60
Flash Point, PMCC	ASTM D93	°C	210

Axle

Características típicas del aceite Axle

Physical State	Liquid
Color	Brown
Flash Point	Closed cup >180°C (>356°F) [Pensky-Martens]
Pour Point	-39°C
Density @ 15,6°C	885 kg/m ³ (0,885 g/cm ³)
Solubility	Insoluble in water
Kinematic Viscosity @ 40°C	140 mm^2/s (140 cSt)
Kinematic Viscosity @ 100°C	14,34 mm^2/s (14,34 cSt)

Hypoy

Características típicas del aceite Hypoy.

Physical State	Liquid
Colour	Amber /Brownish
Flash Point (Closed, °C)	Above 200
Autoignition (°C)	Above 250
Relative Density (at 20°C)	Below 1.0
Water Solubility	Insoluble
Kinematic Viscosity @ 100°C (cSt)	16,6
Kinematic Viscosity @ 40°C (cSt)	182
Pour Point (°C)	Below minus 24

Cerámica Piezoeléctrica

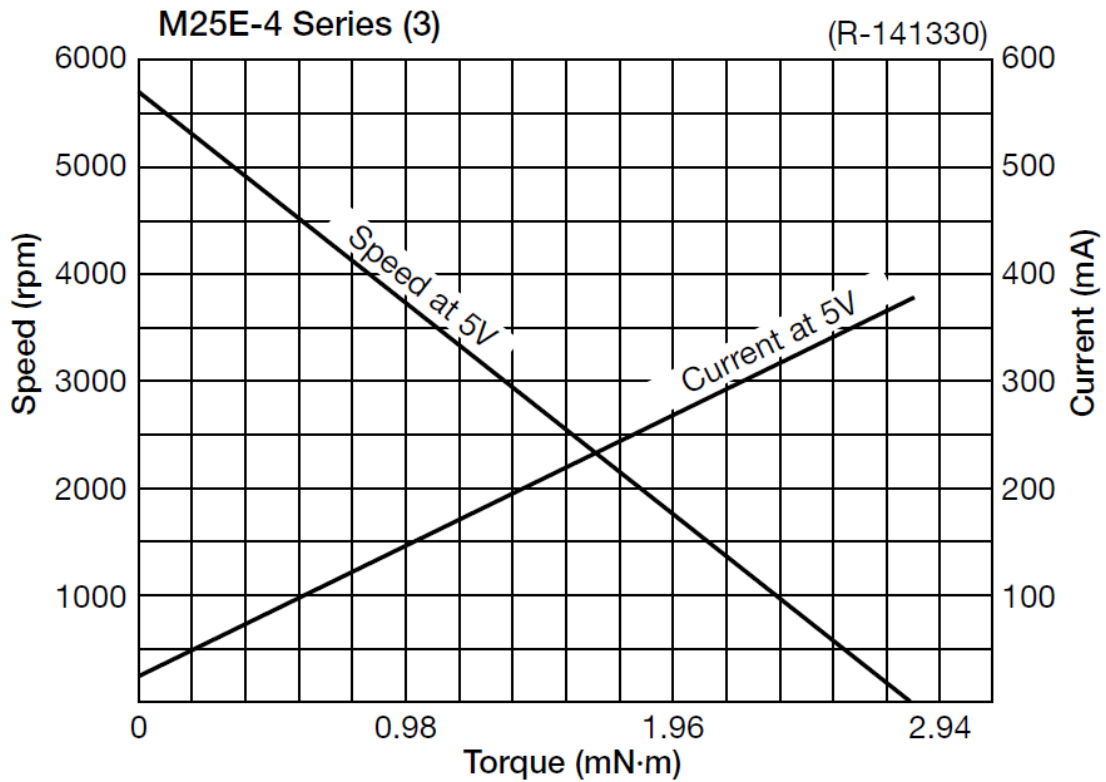
Características de las cerámicas piezoeléctricas Piezo Systems PSI-5A4E

Thick		0,191[mm]
Diameter		12,5[mm]
Capacitance		10,6 nF ($\pm 10\%$)
Composition		Lead Zirconate Titanate
Piezo Systems Material Designation		PSI 5A4E (Industry Type 5A, Navy Type II)
Relative Dielectric Constant (@1KHz)	K_3^T	1800
Piezoelectric Strain Coefficient	d_{33}	$390 \times 10^{-12} m/V$
	d_{31}	$-190 \times 10^{-12} m/V$
Piezoelectric Voltage Coefficient	g_{33}	$24 \times 10^{-3} V/N$
	g_{31}	$-11,6 \times 10^{-3} V/N$
Coupling Coefficient	k_{33}	0,72
	k_{31}	0,32
Polarization Field	E_p	$2 \times 10^6 V/m$
Initial Depolarization Field	E_c	$5 \times 10^5 V/m$
Density	ρ	$7800 Kg/m^3$
Mechanical Q	Q	80
Elastic Modulus	Y_3^E	$5,2 \times 10^{10} N/m^2$
	Y_1^E	$6,6 \times 10^{10} N/m^2$
Thermal Expansion Coefficient		$\sim 4 \times 10^{-6} m/m ^\circ C$
Curie Temperature		350°C

Motor DC

Características del motor de corriente continua M25E-4 Mitsumi.

Rated Voltage (V)	5
Voltage Range (V)	1.0 - 7.0
Rated Load (mN·m)	1.47
Rated Speed (rpm)	2750
Rated Current (mA)	300 max
Starting Torque (mN·m)	1.67 min
Rotation	CW



Características del motor.