

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO ESTABILIZADOR
DE POSICIÓN EN PUENTE FLOTANTE DE GUITARRA ELÉCTRICA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

EDUARDO POTOZEN ZURITA

ASESOR

ALEJANDRO SEGUNDO VERA LÁZARO

<https://orcid.org/0000-0003-0198-338X>

Chiclayo, 2021

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO
ESTABILIZADOR DE POSICIÓN EN PUENTE FLOTANTE
DE GUITARRA ELÉCTRICA**

PRESENTADA POR

EDUARDO POTOZEN ZURITA

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad
Católica Santo Toribio De Mogrovejo para
optar por el título de:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Juan Carlos Vives Garnique

PRESIDENTE

Elmer Rolando Polo Briceño

SECRETARIO

Alejandro Segundo Vera Lázaro

VOCAL

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que contribuyeron a que siga avanzando

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo general.....	11
2.2 Objetivos específicos	11
III. MARCO TEÓRICO	12
3.1 Estado del arte.....	12
2.1.1 Productos similares existentes.....	12
2.1.2 Problemática actual de los productos similares existentes	16
2.1.3 Planteamiento del problema	17
2.1.4 Requerimientos del diseño	17
2.2 Bases teórico científicas.....	18
2.2.1 Fundamentos mecánicos.....	18
2.2.2 Fundamentos electrónicos	25
IV. DISEÑO	30
4.1 Metodología La casa de calidad.....	30
4.1.1 ¿Quiénes son los clientes?.....	30
4.1.2 ¿Qué quieren los clientes?	31
4.1.3 Importancia relativa de los requerimientos: Quién vs. Qué	31
4.1.4 Actualmente ¿Cuán satisfechos están los clientes?	31
4.1.5 ¿Cómo se alcanzarán los requerimientos de los clientes?	32
4.1.6 De requerimientos de los clientes a especificaciones ingenieriles ¿Cómo se mide el qué?	33
4.1.7 Objetivos e importancia de las especificaciones ingenieriles ¿Hasta cuánto es suficientemente bueno?	34
4.1.8 Relaciones entre las especificaciones ingenieriles ¿Cuan dependientes son entre sí?	34
4.2 Diseño conceptual de elementos.....	36
4.2.1 Unidad Motora	36
4.2.2 Resorte.....	36
4.2.3 Tornillo de potencia.....	37
4.2.4 Transmisión de potencia.....	38
4.2.5 Bancada	40
4.2.6 Algoritmo	40
4.2.7 Control electrónico.....	43
V. RESULTADOS	46
5.1 Definición de características	46
5.2 Cálculos justificativos.....	48

VI. SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	50
6.1 Verificación del cumplimiento de los parámetros de diseño	50
6.2 Implementación	51
6.2.1 Bancada y cavidad de alojamiento	51
6.2.2 Portaresorte.....	52
6.2.3 Transmisión de potencia.....	53
6.2.4 Electrónica y control del dispositivo	53
6.2.5 Ensamble	56
6.3 Verificación cuantitativa.....	57
6.3.1 Prueba de cambio de afinación.....	57
6.3.2 Prueba de rotura de cuerda	58
VII. CONCLUSIONES.....	60
VIII.RECOMENDACIONES	61
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
X. ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Simbología de los diagramas de flujo	26
Tabla 2 Tipos de especificaciones ingenieriles	32
Tabla 3 Especificaciones ingenieriles requeridas por el dispositivo	33
Tabla 4 Tipo de relación entre las especificaciones requeridas por el dispositivo	35
Tabla 5 Frecuencia de las notas musicales	46
Tabla 6 Densidad por unidad de longitud de cuerdas de guitarra según su calibre	47
Tabla 7 Hoja de cálculo usada para determinar la fuerza generada por la afinación estándar de una guitarra de 6 cuerdas.....	48
Tabla 8 Hoja de cálculo usada para determinar la fuerza generada por la afinación estándar de una guitarra de 7 cuerdas.....	48
Tabla 9 Hoja de cálculo usada para determinar el torque mínimo que la unidad motriz deberá entregar.....	49

RESUMEN

La guitarra eléctrica es uno de los instrumentos musicales más populares tanto en la música popular como en la académica y el denominado puente flotante (también conocido popularmente como tremolo bar o whammy bar) es uno de los accesorios más deseados para este instrumento, pero a la vez presenta dos grandes desventajas. La primera se da en el caso de que una cuerda se rompa, las demás cuerdas se verán afectadas saliéndose de afinación ya que la totalidad de las fuerzas generadas por la tensión de las cuerdas están en balance con los muelles instalados en la parte posterior del instrumento y la segunda se da debido a que solo puede funcionar en una afinación predeterminada debido a la misma razón expuesta anteriormente. Para resolver estos problemas se construyó un prototipo de un mecanismo que regule automáticamente la tensión que ejercen los muelles para compensar el cambio de fuerza que puede ser provocado cuando el músico desee cambiar la afinación o cuando una cuerda se rompa de su instrumento, el cual redujo el tiempo que toma realizar dichos ajustes respecto al ajuste manual entre un 92-85% y 94-88% respectivamente.

Palabras clave: guitarra eléctrica, puente flotante, cuerdas, vibración, muelles.

ABSTRACT

The influence of the electric guitar, one of the most popular musical instruments worldwide, in popular and academic music is well known. The floating bridge (also known as tremolo bar or whammy bar) is one of the most desired hardware for amateur and professional guitarist alike, but at the same time, it has two major drawbacks. First the opposite forces, exerted in the floating bridge by the strings in tension and the tension springs at the back of the guitar, are balanced. At the same time those forces keep the floating bridge in a parallel position in relation to the body of the guitar. If one string breaks, the others will go inevitably out of tune. Secondly and for the same reason, if the musician wants to change the tuning of his instrument, the strings will go out of tune and the bridge will no longer be parallel in relation to the instrument's body. To solve these problems, a prototype of a mechanism was built that automatically regulates the tension exerted by the springs to compensate for the change in force that can be caused when the musician wants to change the tuning or when a string breaks on his instrument, which reduced the time it takes to make these adjustments compared to manual adjustment between 92-85% and 94-88% respectively.

Keywords: electric guitar, floating bridge, strings, vibration, springs.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de la guitarra eléctrica en el siglo pasado este instrumento ha formado parte importante de muchos géneros musicales y por tanto su difusión ha sido tal que a su paso se gestó una industria alrededor de la manufactura del instrumento y accesorios complementarios (amplificadores, pedales de efecto, software, etc.) que son necesarios para explotar al máximo las posibilidades sonoras del instrumento.

Una guitarra puede ser reducida conceptualmente a un sistema de cuerdas vibrantes acopladas. Las cuerdas vibrantes almacenan energía, pero estas solo irradian directamente una fracción pequeña de esta como sonido, mientras que la mayoría es transmitida hacia el cuerpo, usualmente construido de madera, y el puente, fabricado con diferentes tipos de aleaciones metálicas. En el caso de las guitarras acústicas al tener el cuerpo hueco este actúa como caja de resonancia dándole el timbre y volumen característico, mientras que su contraparte eléctrica recoge las vibraciones de las cuerdas mediante pastillas o micrófonos electromagnéticos (bobinas con núcleo magnético que captan la perturbación del campo electromagnético causada por una cuerda metálica vibrante) y así consigue la amplificación mediante circuitos electrónicos. [1]

Para modificar la frecuencia a la que vibra una cuerda en una guitarra se pueden seguir dos caminos: el primero es la ejecución convencional del instrumento haciendo uso de las manos para modificar la longitud efectiva vibrante de las cuerdas y cuáles de estas vibrarán; el segundo es la modificación de la longitud vibrante de la cuerda al aire aprovechando el puente y haciendo que este pueda pivotar sobre el cuerpo del instrumento resultando en lo que se conoce como puente flotante.

Este tipo de puente presenta dos grandes desventajas:

- En el caso de que una cuerda se rompa, las demás cuerdas se verán afectadas saliéndose de afinación ya que la totalidad de las fuerzas generadas por la tensión de las cuerdas están en balance con los muelles instalados en la parte posterior del instrumento.
- Solo puede funcionar en una afinación predeterminada debido al balance de fuerzas entre muelles y cuerdas explicado anteriormente.

Para resolver estos problemas este estudio se enfocará en dotar al puente flotante, uno de los mecanismos que le entrega al instrumento más posibilidades sonoras, de un sistema capaz de realizar ajustes que regulen la tensión que ejercen los muelles para compensar el cambio de fuerza que pueden devenir de los dos escenarios mencionados en las desventajas de este tipo de puente.

El concepto de puente flotante engloba una gama de mecanismos comercializados por diferentes empresas manufactureras con dos características en común entre todos ellos:

- Se hace uso de resortes o muelles para generar la fuerza necesaria para contrarrestar las fuerzas de las cuerdas en tensión.
- Una palanca es empleada por el músico para que el puente pueda pivotar el puente y así conseguir el efecto sonoro deseado.

La figura 1 explica visualmente el funcionamiento de una guitarra eléctrica con puente flotante.

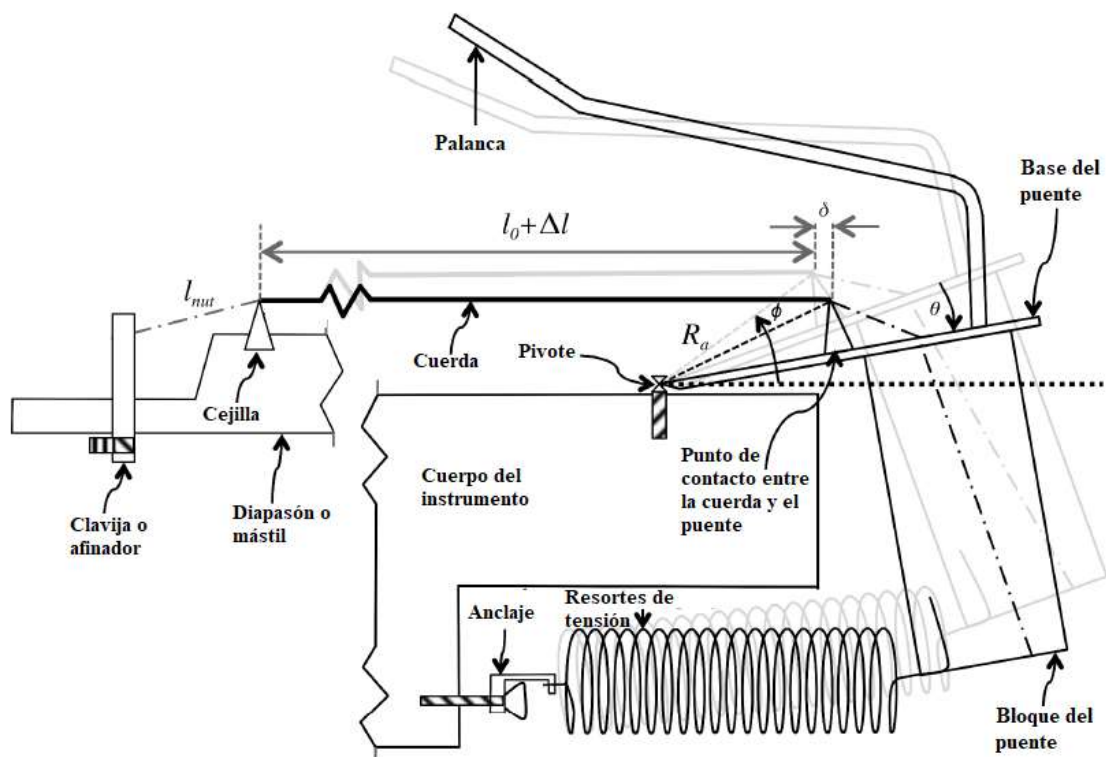


Figura 1. Vista lateral de una guitarra eléctrica mostrando la operación de un puente flotante.

[2]

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un dispositivo capaz de corregir y estabilizar la posición de un puente flotante de una guitarra eléctrica.

2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar y seleccionar los elementos del mecanismo a componer el dispositivo.
- Programar el algoritmo que se grabará en el microprocesador.
- Diseñar el dispositivo haciendo uso de software CAD.
- Construir e implementar el dispositivo en una guitarra eléctrica Ibanez RG7321.
- Comparar los tiempos que toma realizar el ajuste correctivo de la posición del puente flotante entre el dispositivo propuesto y el estándar de la industria.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Estado del arte

2.1.1 Productos similares existentes

En el año 1952, antes que las guitarras eléctricas de cuerpo sólido se popularicen, P. A. Bigsby concibió el concepto de un puente que permitía al músico hacer vibratos (variación periódica de la frecuencia sobre una nota específica) con una palanca, pero este mecanismo solo permitía vibratos sutiles debido a las limitaciones del mismo. [3]

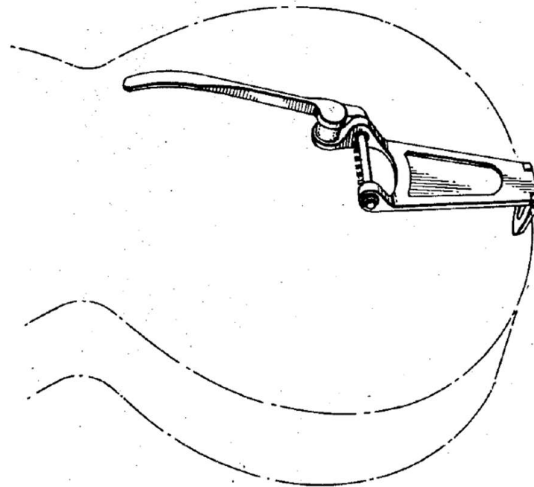


Figura 2. Puente Bigsby para guitarra [3]

En los años del nacimiento de la guitarra eléctrica de cuerpo sólido Leo Fender, luego del éxito que tuvo la icónica Telecaster, trató de implementar un puente con una barra o palanca capaz de alterar la tensión de todas las cuerdas en simultáneo para lograr vibratos más pronunciados que emulen el efecto trémolo (variación periódica en la intensidad o volumen de un sonido) fue Leo Fender quien acuñó y popularizó, incorrectamente, el término “puente trémolo” ya que su invento permitía ejercer vibratos. Este dispositivo pasó a formar parte del modelo Stratocaster, otro modelo icónico; funcionaba al balancear la tensión producida por las cuerdas tensionadas con un juego de muelles o resortes ubicados en una cavidad en la parte anterior del instrumento. La base del puente reposa sobre la madera del cuerpo de la guitarra lo cual solo le permite al músico disminuir drásticamente y aumentar ligeramente la frecuencia a la que las cuerdas estén vibrando. [4]

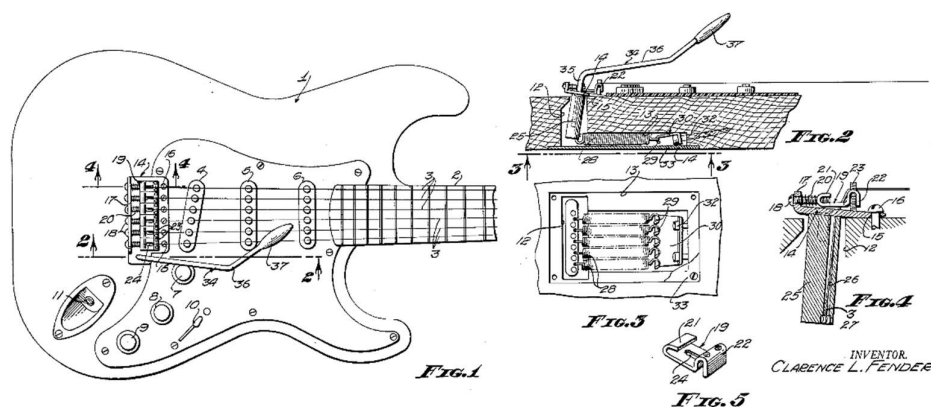


Figura 3. Puente "tremolo" diseñado por Leo Fender para el modelo Stratocaster [4]

Al popularizarse globalmente el modelo Stratocaster de Leo Fender, los músicos siempre estuvieron buscando una mayor libertad para el uso del puente trémolo al ejercer un uso más severo sobre este para obtener un abanico de sonidos más amplio y la respuesta vino de la mano de Floyd Rose. En una primera iteración de su puente, bautizado con su nombre, se eliminó el impedimento para poder también aumentar drásticamente la frecuencia de la nota debido a que el puente ya no descansa sobre madera, sino que se encuentra "flotando" en una pequeña cavidad en la guitarra gracias a la ayuda de dos pivotes. Otro cambio mayor fue el reemplazo de una cejilla (indicado con el número 13 en la figura 4) tradicional por una que restringiera el deslizamiento de las cuerdas logrando así que el músico pueda hacer un uso más agresivo del dispositivo sin la preocupación de desafinar el instrumento. [5]

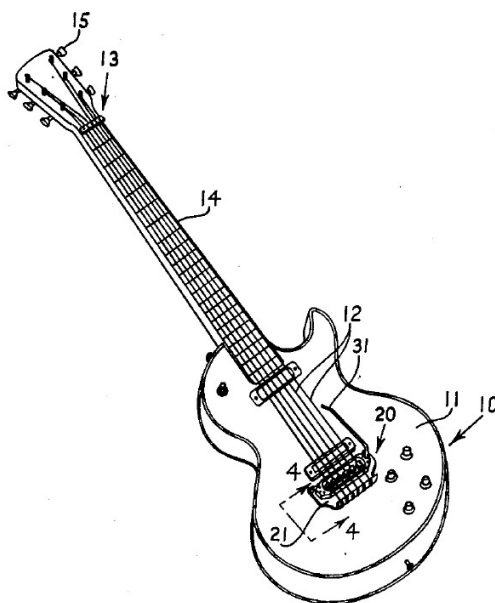


Figura 4. Guitarra con el sistema del primer puente flotante patentado por Floyd Rose [5]

Floyd Rose hizo otra iteración de su puente que agregó microafinadores en el mismo puente, ya que en su anterior modelo una vez que se bloquean las cuerdas a través de la cejilla no se podían usar las clavijas (indicado con el número 15 en la figura 4) para afinar el instrumento. Estos microafinadores cumplen la función de corregir las pequeñas salidas de afinación producidas por el uso severo para el cual el puente está

diseñado. Durante varias décadas el Floyd Rose fue el puente a escoger por muchos guitarristas en búsqueda de esta libertad sonora pero este dispositivo fijaba el instrumento a una sola afinación debido a la complejidad y tiempo que toma afinar y calibrar el instrumento. [6]

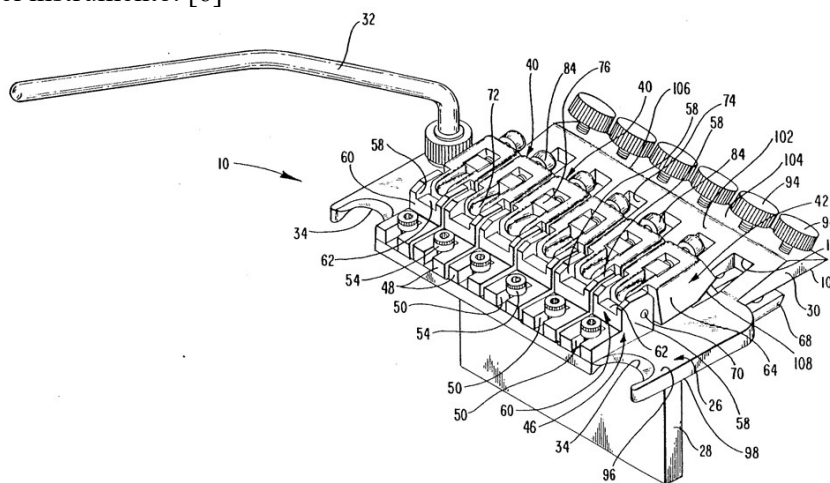


Figura 5. Segundo puente flotante mejorado patentado por Floyd Rose [6]

Con la diversificación del mercado en el siglo XXI nuevas propuestas minimalistas y confiables sugieron como el hardware desarrollado por Hipshot Products Inc. [7] y Vega-trem [8] específicamente en sus puentes trémolo. Estos puentes comercializados son muy similares al ideado por Leo Fender pero incluyendo mejoras que le permiten ser confiable tanto técnicamente como estéticamente.

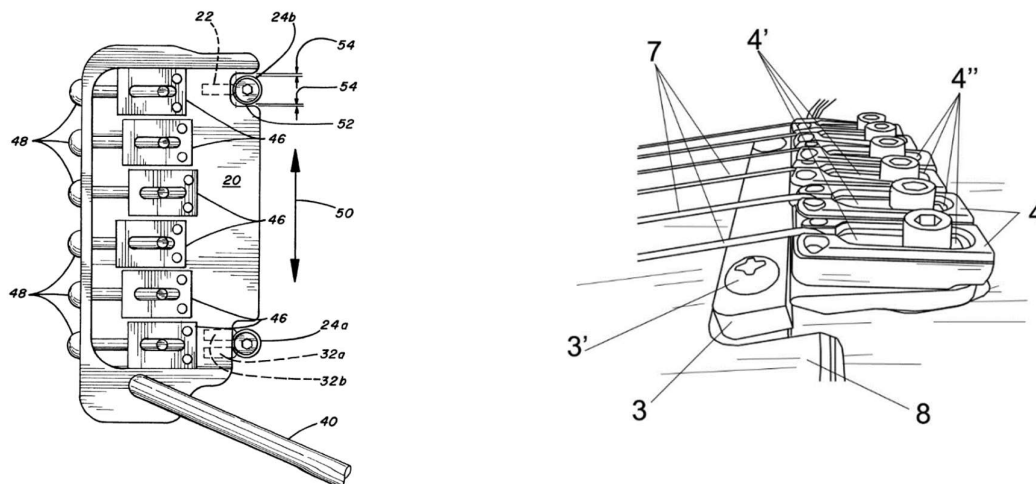


Figura 6. Puentes flotantes comercializados por las empresas Hipshot Products Inc. (izquierda) [7] y Vega-trem (derecha) [8].

La innovación más audaz en el área de los puentes de guitarra vino de mano de Cosmos Lyles y su puente Evertune. Este dispositivo, pese a no ser un puente trémolo y funcionar virtualmente como un puente fijo, tuvo una gran acogida debido a que este puente crea una zona de tensión constante gracias al uso un mecanismo con resorte individual para cada cuerda. Esto permite al instrumento mantener su afinación efectivamente pese a someterse a condiciones de abuso extremo (golpes, cambios de temperatura, cambios de humedad, fatiga extrema sobre las cuerdas, etc). [9]

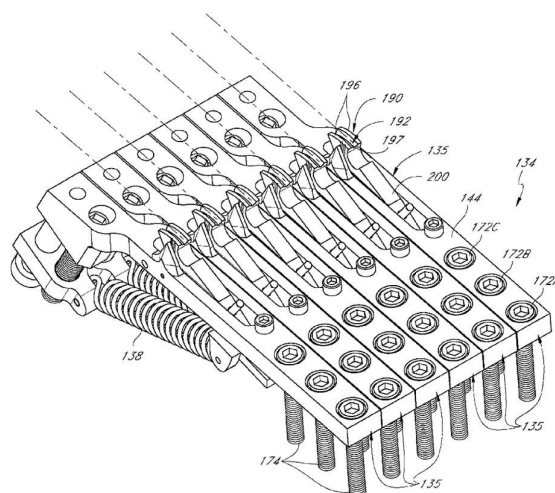


Figura 7. Esquema de la patente del puente Evertune [9]

La última iteración sacada al mercado por Floyd Rose de su puente es una variante pensada para instalar dicho puente en guitarra con puente fijo tipo tune-o-matic (guitarras modelo Les Paul, SG, Flying V, etc.) sin necesidad de fresar una cavidad en el cuerpo del instrumento reemplazando el sistema de resortes de extensión por un solo resorte de compresión ubicado según se muestra en la figura 8. El puente salió al mercado con el nombre de Floyd Rose X [10].

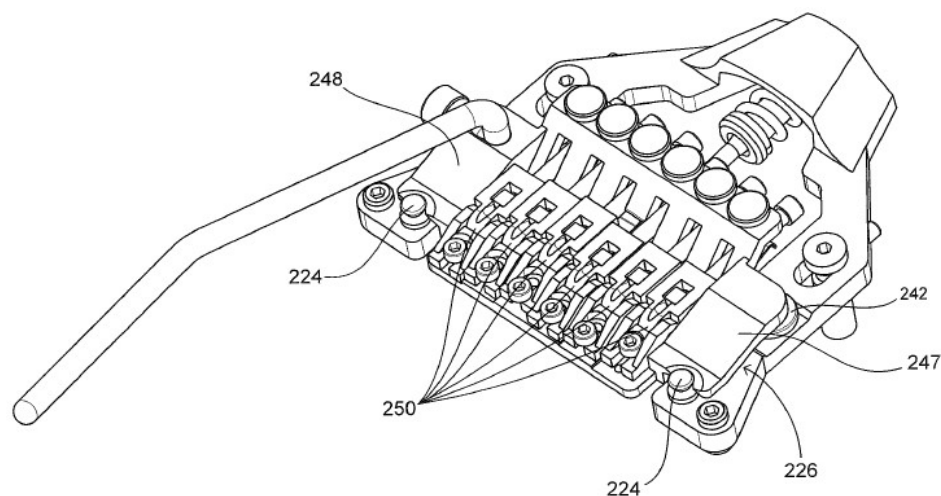


Figura 8. Esquema de la patente del puente Floyd Rose X [10]

Finalmente, una compañía llamada Coherent Sound In Light introdujo al mercado un dispositivo capaz de ajustar manualmente la longitud de operación de los resortes de tensión y restringir el movimiento de los mismos usando un mecanismo accionado por una rueda tornillo ubicada en el bloque del puente flotante como se muestra en la figura 9. El nombre de dicho dispositivo es Sophia Global Tuner. [11]

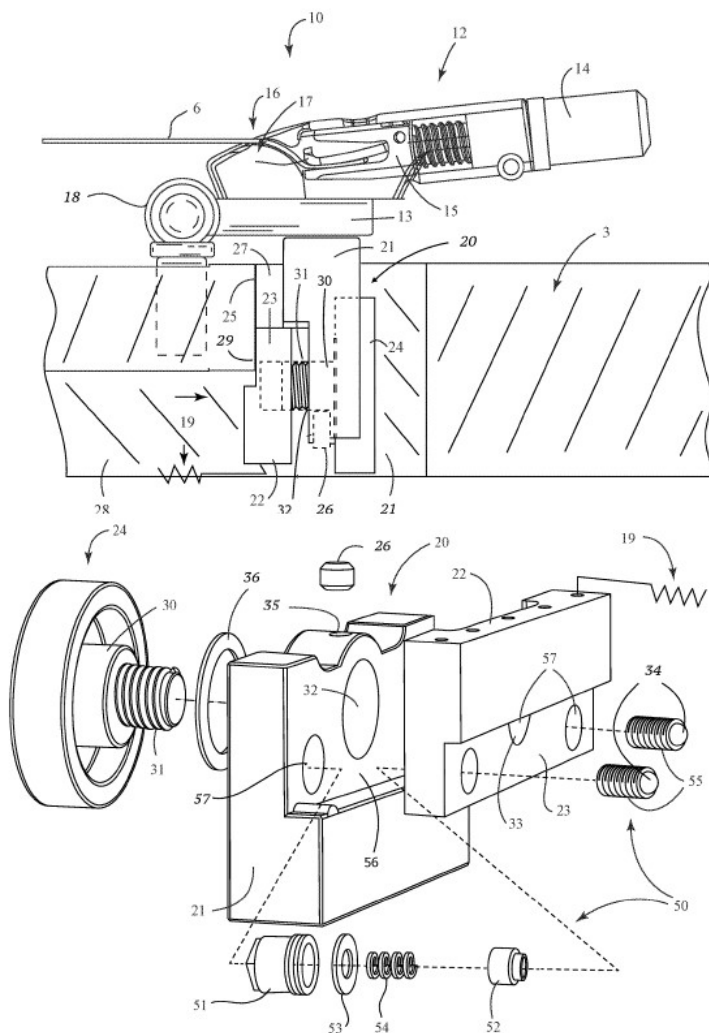


Figura 9. Esquema de la patente del Sophia Global Tuner [11]

2.1.2 Problemática actual de los productos similares existentes

El análisis del estado del arte de los puentes flotantes de guitarra eléctrica permite concluir que estos limitan la capacidad del instrumento de cambiar de afinación de manera rápida y sencilla.

Para lograr un cambio de afinación de las cuerdas de una guitarra con un puente flotante instalado es necesario ajustar de manera simultánea la tensión de las cuerdas usando los afinadores y la longitud de operación de los resortes con ayuda de herramientas (destornillador, llaves hexagonales, entre otros) para lograr que el puente mantenga una posición paralela en relación al cuerpo del instrumento o las cuerdas. Cabe resaltar que el uso de afinaciones en cuerdas con el calibre (ancho del diámetro) inadecuado puede resultar en un instrumento incapaz de entonar bien las notas que se intenten tocar.

En el eventual caso que una cuerda falle y se rompa las demás cuerdas se desafinarán ya que se perdería el balance de fuerzas entre las cuerdas y los resortes. Para evitar que el instrumento quede totalmente inoperativo el dispositivo o mecanismo que resolvería el primer problema expuesto en esta sección también, en teoría, debería ser capaz de resolver este también. Este dispositivo permitiría al ejecutante del instrumento terminar una pieza musical en el caso de una presentación en vivo y además simplificar el proceso de reemplazo de cuerdas.

2.1.3 Planteamiento del problema

La necesidad de mantener una afinación constante en la guitarra eléctrica ha sido fruto de innovación de diferentes compañías. Las innovaciones que han tenido gran aceptación por el mercado y el público especializado han sido dispositivos de actuación meramente mecánica. Los dispositivos de actuación mecatrónica no gozaron del éxito debido a que estos sistemas no probaron ser confiables y eficaces en las condiciones de funcionamiento de un músico de escenario. Todas estas nuevas tecnologías se han centrado en mantener una afinación constante en guitarras con puente fijo en un entorno en donde el instrumento está sometido a las inclemencias de las giras (humedad y temperaturas cambiantes, golpes, etc).

Uno de los efectos sonoros más usados en el instrumento en cuestión es el vibrato (variación oscilatoria sobre un tono o frecuencia determinada) que es usualmente logrado con un puente flotante accionado por una barra tremolo (nombre incorrecto pero popular) a la cual el músico aplica una fuerza para mover el puente y así ajustando las frecuencias sonoras. [12]

Para los músicos, especialmente los de gira, que necesitan una guitarra con un sistema de puente flotante usualmente se ven obligados a llevar dos guitarras por cada afinación que necesite el repertorio (una guitarra principal y otra de contingencia) lo que incrementa los costos operativos de la gira.

2.1.4 Requerimientos del diseño

El objetivo de esta investigación es resolver los problemas expuestos mediante un dispositivo mecatrónico que sea capaz de regular la tensión del juego de muelles que contrarrestan las fuerzas provocadas por las cuerdas, resultando en una guitarra con puente flotante capaz de cambiar de afinación en mitad de una presentación según el músico requiera y que también mantenga esa afinación en caso de que un evento proco probable, pero no inevitable, como la ruptura de una cuerda ocurra.

El dispositivo, o al menos la parte mecánica de este, debe caber en la cavidad actualmente destinada para alojar el set de resortes de tensión y su anclaje en la parte posterior de la guitarra. Las dimensiones de esta cavidad son aproximadamente las mismas en todas las guitarras por lo cual empíricamente se determina que se dispone con un espacio de 100mm x 45mm x 20mm en donde se deben alojar los componentes mecánicos y de potencia del dispositivo.

La parte electrónica del dispositivo puede ubicarse en la cavidad en donde se encuentran los controles electrónicos del instrumento para así minimizar cualquier posibilidad de tener que maquinar la madera del cuerpo del instrumento. Estas medidas se consideran para poder aumentar las probabilidades de un posible futuro éxito comercial.

2.2 Bases teórico científicas

2.2.1 Fundamentos mecánicos

2.2.1.1 Física detrás de los instrumentos musicales de cuerdas

Evidencia histórica y arqueológica indica que una de las particularidades de los homínidos constituye en la capacidad de estos para emitir sonidos específicos y regulares a través de objetos hechos o modificados por ellos mismos.

Una de las formas en la que se puede generar sonidos específicos se da a través de la excitación de un cuerpo alargado de grosor relativamente constante, actualmente llamado cuerda, fijado en dos extremos y sometido a tensión mecánica. Pitágoras durante el sexto siglo antes de la era común describió que al dividir la longitud de una cuerda vibrante o excitada en simples proporciones (1/2, 3/2, etc) produce intervalos musicales consonantes que nosotros interpretamos como sonidos placenteros y no placenteros a proporciones más complejas (15/8, 16/15, etc).

Se indica en [13] que las cuerdas de una guitarra vibran como ondas estacionarias, es decir, dos ondas sinusoidales idénticas que viajan en direcciones opuestas en el mismo medio. Su expresión matemática es la siguiente:

$$y(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - 2\pi ft\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + 2\pi ft\right)$$

Donde: (i)

A = Amplitud de onda (m)

λ = longitud de onda (m)

f = Frecuencia (Hz)

A continuación en [14] se analizarán expresiones matemáticas de la onda. Teniendo en cuenta que cualquier onda unidimensional que viaja con una rapidez v en la dirección x se representa mediante una función de onda de la forma:

$$y(x, t) = f(x \pm vt) \quad \text{(ii)}$$

Al analizar las ecuaciones (i) y (ii) se puede concluir que la rapidez de la onda puede ser expresada en función de otros parámetros de la misma, como se muestra en la ecuación (iii).

$$v = f\lambda \quad \text{(iii)}$$

Para que una cuerda vibre esta tiene que estar sometida a una tensión T . Se considera una pequeña sección de cuerda de longitud diferencial Δx y cuyos extremos de este elemento forman ángulos θ_A y θ_B con el eje x como se muestra en la figura 9.

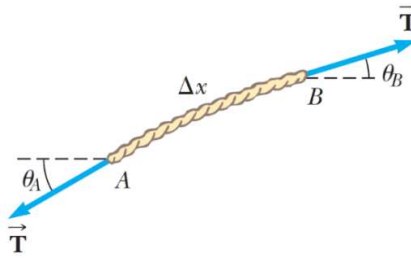


Figura 9. Un elemento de cuerda bajo tensión T .

La fuerza neta que actúa sobre el elemento en la dirección vertical es:

$$\sum F_y = T \sin(\theta_B) - T \sin(\theta_A) \quad (\text{iv})$$

Como los ángulos son pequeños se puede expresar la ecuación (iv) de la siguiente manera:

$$\sum F_y \approx T[\tan(\theta_B) - \tan(\theta_A)] \quad (\text{v})$$

Ya que las tangentes se evalúan en un instante particular de tiempo, se debe expresar en forma parcial como $\partial y / \partial x$.

$$\sum F_y \approx T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_B - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_A \right] \quad (\text{vi})$$

Se aplica la segunda ley de Newton a la sección de la cuerda analizada introduciendo μ que es la masa por unidad de longitud de la cuerda (kg/m).

$$\sum F_y = ma_y = \mu \Delta x \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) \quad (\text{vii})$$

Las ecuaciones (vi) y (vii) se igualan.

$$\begin{aligned} \mu \Delta x \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) &= T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_B - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_A \right] \\ \frac{\mu}{T} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) &= \frac{(\partial y / \partial x)_B - (\partial y / \partial x)_A}{\Delta x} \end{aligned} \quad (\text{viii})$$

La ecuación (viii) tiene una forma muy similar a la expresión matemática que define la derivada parcial pudiendo simplificar el término ubicado a la derecha del signo igual.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \right) \\ \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (\text{ix})$$

Se toma en cuenta que la ecuación diferencial de onda lineal para una cuerda es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (\text{x})$$

Las ecuaciones (ix) y (x) se igualan para despejar para tensión, con ayuda de la ecuación (iii) que es el parámetro con el cual se va a dimensionar la potencia del dispositivo y dejar la ecuación en función de parámetros conocidos.

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\mu}{T}$$

$$T = \mu v^2$$

$$T = \mu f^2 \lambda^2 \quad (\text{xi})$$

2.2.1.2 Resortes mecánicos helicoidales

Los resortes mecánicos son cuerpos, usualmente metálicos, capaces de almacenar energía gracias al uso de geometría ingeniosa y el aprovechamiento de las propiedades mecánicas del material con el que está constituido tales como su rigidez y flexibilidad.

Los resortes helicoidales son los más comunes y reconocibles. Están constituidos por alambre redondo o cuadrado arrollado helicoidalmente y se clasifican según el tipo de carga que manejan: de compresión y de tensión.

El autor en [15] desarrolla matemáticamente un resorte helicoidal sometido a una fuerza, base que es necesaria para el posterior dimensionamiento de un resorte en función de la carga que va a soportar, su geometría y material.

En la figura 10 se presenta un resorte helicoidal de compresión hecho de alambre redondo, sometido a una fuerza axial F . Se designará con D el diámetro medio de la espira y con d el diámetro del alambre.

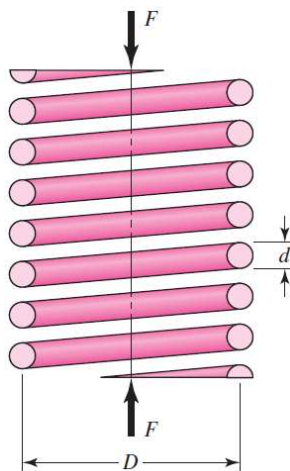


Figura 10. Resorte helicoidal con carga axial.

Para analizar las fuerzas internas que actúan en el alambre del resorte se hace un corte imaginario para desarrollar un diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 11. La carga ejercería una fuerza cortante directa F y una torsión $T = FD/2$ (no confundir con la tensión T de la cuerda del apartado anterior).

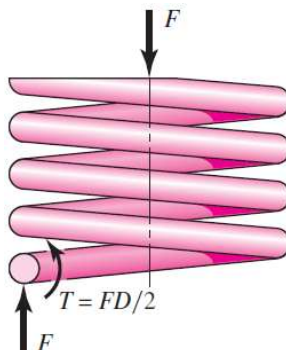


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de la sección del resorte de la figura 10.

Se debe tener en cuenta un parámetro de la medida de la curvatura de las espiras llamado índice del resorte que es el cociente entre el diámetro de la espira del resorte D entre el diámetro del alambre d del mismo.

$$C = \frac{D}{d} \quad (\text{xii})$$

Según el teorema de Castigliano la energía de deformación de un resorte helicoidal con una componente de torsión y una de cortante está dada por la siguiente expresión.

$$U = \frac{T^2 l}{2GJ} + \frac{F^2 l}{2AG}$$

Donde:

$$T = \text{Par de torsión (N.m)} = FD/2$$

$$l = \text{Longitud del alambre (m)} = \pi D N_a \quad (N_a = \text{número de espiras activas del resorte})$$

$$G = \text{Módulo de rigidez del material del alambre (Pa)}$$

$$J = \text{Momento polar del área transversal del alambre (m}^4\text{)} = \pi d^4/32$$

$$A = \text{Área transversal del alambre (m}^2\text{)} = \pi d^2/4$$

Resultando en:

$$U = \frac{4F^2 D^3 N_a}{d^4 G} + \frac{2F^2 D N_a}{d^2 G} \quad (\text{xiii})$$

El teorema de Castigliano también especifica que la deflexión total y del cuerpo es la derivada parcial de la energía de deformación con respecto a la fuerza aplicada sobre este, es decir, para hallar la deflexión se deriva parcialmente la ecuación (xiii) con respecto a F , se emplea también la ecuación (xii).

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} + \frac{4FDN_a}{d^2G}$$

$$y = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} \left(1 + \frac{1}{2C^2}\right) \cong \frac{8FD^3N_a}{d^4G} \quad (\text{xiv})$$

La expresión dentro del paréntesis en la ecuación (xiv) es muy cercana a la unidad por lo que la deflexión total y puede expresarse con el resto de la ecuación.

El parámetro más importante del resorte es la constante del resorte k que es igual al cociente de la fuerza a la que es sometido el resorte entre la deflexión total que experimenta bajo la misma, por tanto se usará la ecuación (xiv) para expresar la constante del resorte o muelle en función de su geometría y material con el cual está hecho.

$$k = \frac{F}{y} = \frac{F}{\frac{8FD^3N_a}{d^4G}} = \frac{d^4G}{8D^3N_a} \quad (\text{xv})$$

2.2.1.3 Tornillo de potencia

Un tornillo de potencia es un dispositivo que convierte la rotación de entrada de un torque aplicado a un movimiento lineal de salida de una fuerza axial, es decir, convierte el movimiento angular a movimiento lineal. Su uso es ampliamente difundido como por ejemplo: tornillos de tornos, prensas de sujeción, gatos, etc. [16]

Debido a que la alta fricción en la rosca causa un “autobloqueo” cuando el torque de entrada es retirado la necesidad de elementos que sostengan la carga no son necesarios.

Existen tres formas de roscas que se usan usualmente [17]:

Rosca cuadrada: Es la más difícil de maquinar y la más eficiente también. La fricción es baja y no hay fuerzas radiales transmitidas a las tuercas de acoplamiento.

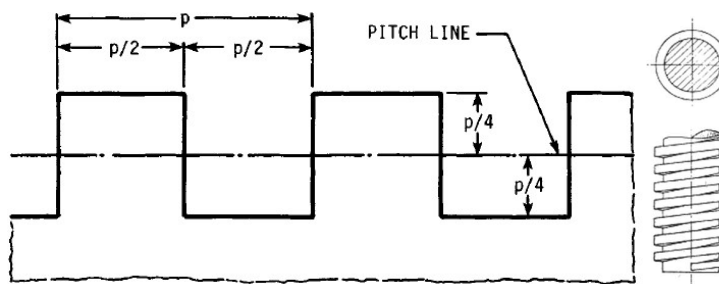


Figura 12. Geometría de la rosca cuadrada en función del paso de la rosca p .

Rosca Acme: Es más fácil de maquinar a comparación de la cuadrada y también posee una rigidez superior en la raíz de la rosca. Esta rosca posee una eficiencia óptima de 70% para ángulos de hélice entre 25° y 65° .

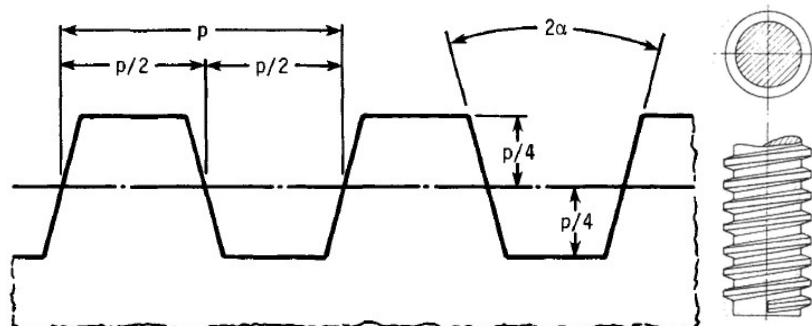


Figura 13. Geometría de la rosca Acme en función del paso p y ángulo α de la rosca.

Rosca Buttress o de apoyo: Posee baja fricción y está diseñada solo para soportar cargas axiales unidireccionales, llegando a eficiencias cercanas a la de las roscas cuadradas.

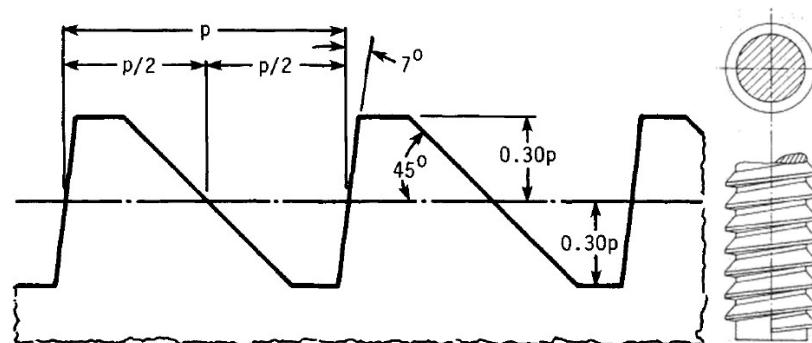


Figura 14. Geometría de la rosca buttress o de apoyo en función del paso de la rosca p .

La geometría que el tornillo de potencia está restringido por el espacio físico al cual está confinado y, en caso de que la carga sea considerable, por cálculos de esfuerzo. Para poder dimensionar la potencia encargada de mover la carga asociada al tornillo de potencia el autor en [18] brinda la ecuación (xvi) para hallar el torque necesario para mover la carga netamente axial aplicada al tornillo de potencia según el diagrama de cuerpo libre de la figura 15.

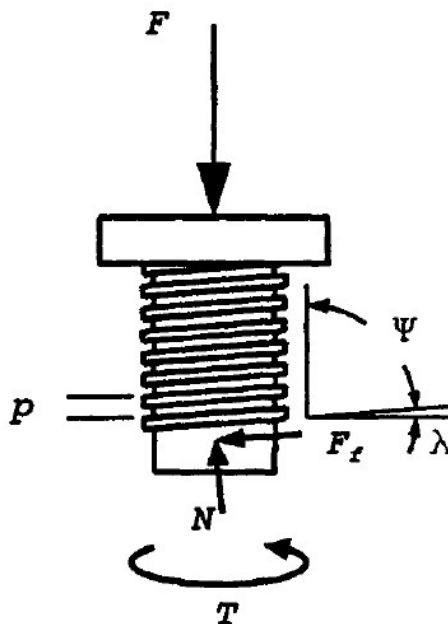


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de un tornillo de potencia sometido a una carga axial F .

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi \mu_t d_m + L \beta}{\pi d_m \beta - \mu_t} \right) \quad (\text{xvi})$$

Donde:

T = Par de torsión requerido para mover la carga F en su dirección opuesta (N.m)

L = Longitud de avance del tornillo en una revolución (m) = $\pi d_m \tan(\lambda)$

d_m = Diámetro de paso del tornillo (m) = $d - p/2$ (d = diámetro mayor; p = longitud de paso)

μ_t = Coeficiente de fricción de la rosca (adimensional)

β = Parámetro de la geometría de la rosca (adimensional) = $\cos(\alpha)$ (α = ángulo de la rosca)

2.2.1.4 Bandas de sincronización

Pertencen al grupo conocido como elementos de máquinas flexibles junto a los cables, otros tipos de bandas y similares. Usualmente se usan en los sistemas de transporte y para la transmisión de potencia sobre distancias largas. Su costo, en comparación a los elementos de transmisión de potencia rígidos (ejes, engranajes, cojinetes, etc.), es notablemente bajo por lo que su empleo reduce en gran medida el costo de la máquina a manufacturar. [19]

Una banda sincrónica o de sincronización, cuyo diagrama se muestra en la figura 16, se manufactura con tela impregnada de caucho con alambre de acero el cual le brinda resistencia frente a la carga de tensión sobre la banda. Posee dientes que entran en ranuras axiales formada en la periferia de las poleas.

Debido a la construcción y materiales usados estas bandas no se estiran ni deslizan y por tanto transmiten potencia a una velocidad angular constante y también precinden de tensión inicial o precarga (necesaria para los otros tipos de bandas).

La eficiencia que mantienen sobre un amplio intervalo de velocidades angulares están entre un 97 a 99% y debido a que no requieren lubricación y son más silenciosas que las transmisiones de cadena son una solución muy atractiva para requisitos de transmisión de precisión.

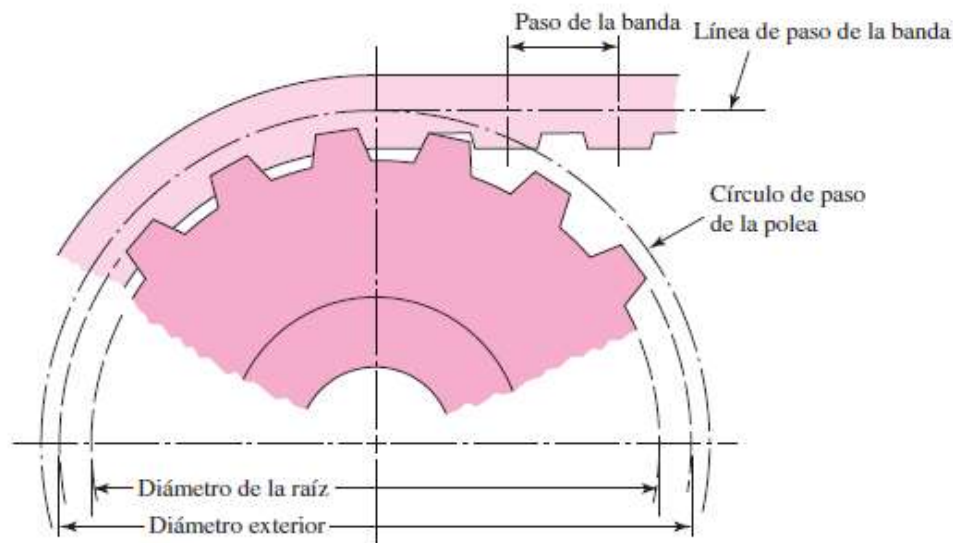


Figura 16. Diagrama de una banda de sincronización.

2.2.2 Fundamentos electrónicos

2.2.2.1 Algoritmos y diagramas de flujo

Se denomina algoritmo a la secuencia de pasos de un modelo matemático que busca la solución de un problema determinado; es sinónimo de procedimiento computacional y es fundamental para la ciencia de la programación.






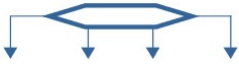



El autor en [20] define algoritmo como toda receta, proceso, rutina, método que debe resolver un problema y además debe cumplir las siguientes condiciones:

1. Ser finito: Debe ejecutarse y finalizar en un tiempo finito.
2. Ser preciso: No debe haber ambigüedades en cada paso.
3. Posee entradas: Se toman como un conjunto específico de datos que inicializan el algoritmo.
4. Posee salida: Es la transformación de la entrada.
5. Ser efectivo: Debe resolver el problema para el cual está diseñado de modo exacto y en un tiempo finito.

La presentación de un algoritmo en un lenguaje natural, utilizando el inglés estructurado, se conoce como pseudocódigo (if, when, then, etc.). Puede ser interpretado por toda la comunidad en computación y es una forma general de presentar un algoritmo. Para el

diseño del mismo el diagrama de flujo es la herramienta más conocida debido a que es fácil de usar. Los diagramas de flujo usan la simbología presentada en la siguiente tabla.

Tabla 1 Simbología de los diagramas de flujo

Símbolo	Denominación	Significado
	Terminal	Inicio y fin de un programa
	Proceso	Acciones a ejecutar
	Decisión	Indica operaciones lógicas o de comparación
	Entrada	Ingreso de datos
	Salida	Salida de resultados
	Selector múltiple	Decisión con múltiples alternativas
	Conector	Enlaza dos partes de un programa
	Línea de flujo	Indica la dirección de flujo del diagrama
	Conector fuera de página	Conexión entre partes del algoritmo en páginas diferentes

2.2.2.2 Microcontroladores

Un controlador es aquel dispositivo encargado del gobierno de uno o más procesos. Inicialmente los controladores eran dispositivos de lógica discreta (un circuito especial para determinado uso) pero actualmente los microprocesadores ayudados de chips de memoria son opciones programables para una gama muy extensa de usos. Hoy en día los elementos antes mencionados son comercializados en un solo chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. A fin de cuentas, un microcontrolador es un sencillo pero completo computador contenido en el corazón de un circuito integrado (chip). [21] [22]

Una plataforma de código abierto bastante difundida entre profesionales y aficionados de la programación de microcontroladores es Arduino. Este está compuesto por dos partes principales: la placa Arduino (la cual se puede encontrar en diferentes modelos y tamaños a precios muy accesibles) y el entorno de desarrollo integrado (IDE, Integrated Development Environment) el cual es el componente de software. Se usa el IDE para crear un algoritmo (boceto o sketch) que se carga en la placa Arduino, este boceto basado en el lenguaje de programación C++ es el que le dice a la placa qué hacer. [23] [24]

2.2.2.3 Sensores de desplazamiento y proximidad.

Estos dispositivos permiten medir la distancia o ángulo que un determinado componente se mueve respecto a una posición determinada. Para realizar esta medición se usan principalmente dos tipos de sensores: los que utilizan contacto y los que no lo hacen.

Los sensores pueden usar propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas o una combinación de las anteriores; así las características propias de estos hacen que tengan unas determinadas propiedades y sean aplicables en determinados aspectos de la robótica. Los tipos de sensores son:

- Potenciómetros
Es un elemento resistivo que tiene un contacto deslizante o cursor con desplazamiento a lo largo del elemento que puede ser lineal o rotacional. Este desplazamiento se convierte en una diferencia de potencial que se puede medirse y disponer un sistema calibrado de manera que por cada potencial se obtenga proporcionalmente una distancia de desplazamiento. La resolución del potenciómetro como sensor va a depender de esta calibración. [25] [26]
- Sensores capacitivos
Los elementos capacitivos usados como sensores son variables de manera que el desplazamiento a medir provocará así mismo un desplazamiento rotacional o lineal según sea el caso en algún componente del condensador, y por lo tanto, una modificación de su capacidad. [27]
- Sensores inductivos
Son usados como sensores de presencia o posición y están formados por una bobina, un objeto ferromagnético (del cual se desea determinar su desplazamiento o presencia) y un imán permanente. Si el objeto ferromagnético se mueve cerca del imán dispuesto en las cercanías de la bobina se originará una variación del flujo magnético a través de esta lo que generará una fuerza electromotriz inducida. Esta corriente es la que puede ser usada como detector de presencia del objeto. [28]
- Sensores basados en el efecto Hall
Estos dispositivos aprovechan la presencia de un campo magnético en un semiconductor para producir un cambio en la corriente eléctrica generada, de manera que se utiliza la presencia o ausencia del campo magnético para proporcionar un determinado nivel de tensión. Se suelen utilizar usualmente como detectores sin contacto para posición, desplazamiento y proximidad. [29]
- Sensores ópticos
Para la medición de distancias menores se usan dispositivos denominados interferómetros que permiten determinar la diferencia entre las distancias recorridas por dos ondas luminosas a partir del patrón de interferencia de dichas ondas. [30]

- Sensores de ultrasonido
Funcionan de manera análoga a los interferómetros a diferencia de que en vez de luz se usan ondas sonoras de frecuencia superior a la del oído humano (20KHz) y pueden medir distancias mucho mayores a la de los sensores anteriormente descritos. [31]

2.2.2.4 Actuadores electromecánicos rotativos

Los dispositivos electromecánicos emplean campos magnéticos junto con materiales ferromagnéticos, cuya permeabilidad magnética de este tipo de material es hasta diez veces el espacio que lo rodea, para guiar y concentrar estos campos cuyos patrones están definidos y determinados mediante la geometría del material. En estos dispositivos la energía se acumula en los campos magnéticos y eléctricos (un campo eléctrico genera un campo magnético perpendicular al primero) que cuando, por los efectos de la configuración de las partes al constituir los límites de campo, se crean fuerzas mecánicas que tienden a mover a los elementos mecánicos de manera que la energía se transmite del campo electromagnético hacia el sistema mecánico. En un dispositivo electromecánico rotativo los voltajes se generan por medio de movimiento relativo de un campo magnético con respecto a un devanado y el movimiento rotatorio se produce con la aparición de pares de fuerza mediante la interacción de los campos magnéticos de los devanados del rotor (parte que gira) y del estator (parte estática). Los diferentes tipos de máquinas eléctricas rotativas se deben a los diferentes métodos de conexión y excitación de los devanados, siendo los mismos principios básicos para todas. En situaciones donde se requiere de una máquina electromecánica rotativa de reducidas dimensiones y alto grado de control de giro, como el que requiere esta situación, la única opción viable vendría a ser un motor de reluctancia variable, específicamente, un motor de pasos. El tipo más difundido de motor de pasos en el mercado es el de tipo híbrido que, mediante la aplicación apropiada de corrientes de fase a los devanados del estator se puede hacer que estos motores giren en pasos bien definidos desde una fracción de grado por pulso (0.9° y 1.8°), cuyo control se hace desde un dispositivo digital. [32]

Para especificar las características de un motor paso a paso se usan los siguientes parámetros [33]:

- Fase

Cantidad de devanados independientes del estator. Usualmente se comercializan motores de 1, 2, 3 y cuatro fases.

- Ángulo de paso

Ángulo que el rotor gira durante un paso o cambio de estado en los devanados del estator.

- Par de retención

Máximo par que se puede aplicar a un motor energizado sin modificar su posición de reposo y ocasionar la rotación del eje del rotor.

- Par máximo de enganche

Máximo par con el que puede arrancar un motor, dada una frecuencia de pulsos, y lograr la sincronización sin perder un paso.

- Par máximo de desenganche

Máximo par que es posible aplicar a un motor, trabajando a una frecuencia de pasos, sin desincronizarse.

- Frecuencia de enganche

Frecuencia de conmutación máxima a la que un motor cargado puede arrancar sin perder un paso.

- Frecuencia de desenganche

Frecuencia de conmutación a la que un motor cargado puede mantenerse sincronizado conforme se reduce la frecuencia de conmutación.

- Velocidad de progresión

Rango de frecuencias de conmutación entre el enganche y el desenlace dentro del cual el motor funciona en sincronía, pero no puede arrancar ni invertir su giro.

IV. DISEÑO

4.1 Metodología La casa de calidad

Uno de los mejores métodos y el más popular para generar especificaciones de ingeniería es el denominado *Quality Function Deployment* (QFD, Despliegue de la función de calidad) que fue desarrollado en Japón en la década de 1970 e introducido en Estados Unidos en la década siguiente. El aplicar este método da como resultado la construcción de “la casa de calidad”, mostrada en la figura 18, y cuyos pasos descritos en [34] se desarrollarán en este apartado.

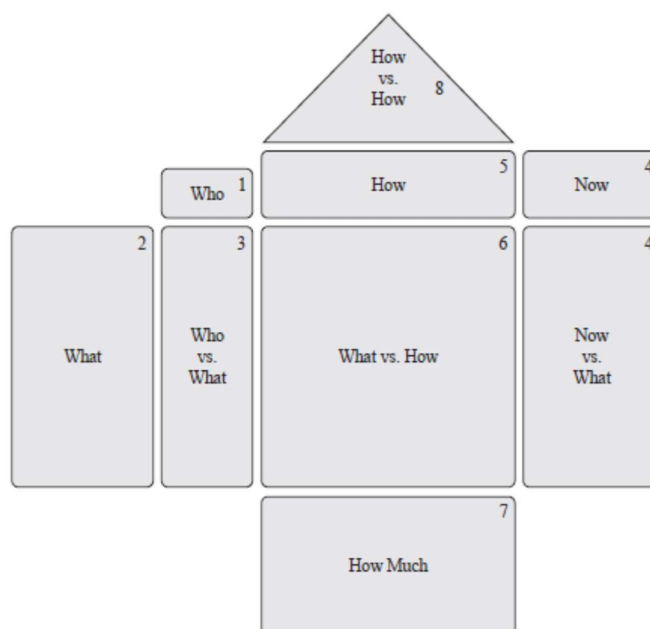


Figura 18. Diagrama de la casa de calidad

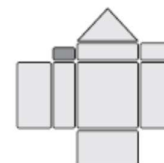
4.1.1 ¿Quiénes son los clientes?

Para la mayoría de productos los clientes son los consumidores quienes comprarán el producto y a su vez intercambiarán opiniones con otros consumidores acerca de su calidad, o falta de esta. Es importante considerar también dos tipos de clientes:

- Clientes internos: Pertenecen a la organización que diseña, manufactura y distribuye el producto.
- Clientes externos: Principalmente los consumidores del producto que pueden tener ciertas características que ameriten diferenciarlos o no. Las organizaciones de estandarización también deben ser consideradas en la medida que los requerimientos lo ameriten.

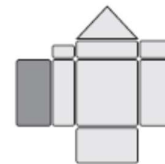
Para este caso de diseño en particular se proponen los siguientes clientes:

- Guitarrista: Cliente externo, consumidor al cual va dirigido el producto.
- Manufacturista: Cliente interno, buscará eficiencia y eficacia en el maquinado de piezas, selección y disposición de partes.



4.1.2 ¿Qué quieren los clientes?

Una vez identificados los clientes lo siguiente es determinar qué es lo que estos quieren. Por lo general el cliente desea un producto que funcione como deba, sea durable, fácil de mantener, se vea atractivo, incorpore la última tecnología, entre otras.



Lo que se debe tener en cuenta es que la clave en este paso es la recolección de información mediante tres métodos: observaciones, encuestas y grupos de enfoque. Afortunadamente la mayoría de productos son iteraciones mejoradas de productos ya existentes lo cual hace posible que los requerimientos puedan conseguirse mediante observaciones al mercado y a los potenciales clientes.

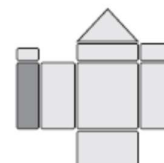
La mejor manera de disponer los requerimientos es de manera jerárquica, como se muestra a continuación para el presente caso de diseño:

1. Mantener el puente en una posición fija
 - a. Mecanismo simple
 - b. Sensor pequeño y simple
 - c. Control electrónico preciso y fiable
2. Implementación e instalación
 - a. Integración con puentes existentes
 - b. Evitar creación de nuevas cavidades la madera
 - c. Unidad digital y de almacenamiento de energía junto a la electrónica del instrumento.
3. Interfaz hombre-máquina
 - a. Fácil acceso
 - b. Notificación simple

4.1.3 Importancia relativa de los requerimientos: Quién vs. Qué

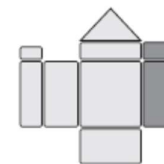
Lo siguiente es evaluar la importancia de los requerimientos generando un factor de ponderación para cada uno.

Tradicionalmente se les pedía a los clientes evaluar la lista de requerimientos y asignarle a cada uno un número del 1 al 10 según su importancia, pero esto generaba que la gran mayoría de requerimientos reciba un 8, 9 o 10 (todo es importante). Un mejor método es el de la suma fija en donde se pide a los clientes que distribuyan 100 puntos en todos los requerimientos permitiendo diferencias de puntaje más notables que el método anterior.



4.1.4 Actualmente ¿Cuán satisfechos están los clientes?

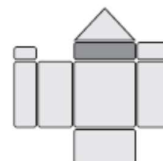
El objetivo en este paso es determinar la percepción del cliente respecto a la habilidad de la competencia en alcanzar la lista de requerimientos elaborada. Aunque lo más probable es que se esté trabajando en un nuevo diseño siempre hay competencia en al menos con los productos que satisfacen de manera parcial los requerimientos en cuestión. Este proceso en el mundo de la gerencia existe con el nombre de *benchmarking*, que es la comparación minuciosa de compañías que compiten directa o indirectamente.



Por cada requerimiento se evalúa el diseño existente en la escala del 1 al 5 donde:

1. El producto no cumple con el requerimiento.
2. El producto cumple apenas con el requerimiento.
3. El producto cumple parcialmente con el requerimiento.
4. El producto cumple casi totalmente con el requerimiento.
5. El producto cumple totalmente con el requerimiento.

4.1.5 ¿Cómo se alcanzarán los requerimientos de los clientes?



Para cumplir con los requerimientos planteados es necesario desarrollar especificaciones ingenieriles, es decir, traducir los requerimientos en términos de parámetros medibles con el objetivo de alcanzar ciertos valores. Esto sirve para concebir una visión ideal del producto que alimentará el criterio para las decisiones de diseño.

Se empieza por identificar la mayor cantidad de parámetros que indiquen el nivel de logro del requerimiento. Cada parámetro debe tener que ser medible y por ende debe tener unidades. En caso de que no se pueda medir cierto parámetro para determinado requerimiento entonces este no está bien definido; esto puede corregirse al desdoblar el requerimiento en cuestión en partes más independientes o, en todo caso, se deberá volver a realizar el paso 2 prestándole más atención.

Se presenta la siguiente tabla que muestra los tipos de especificaciones ingenieriles a fin de servir como guía para definir los que serán usados para el contexto de este documento.

Tabla 2 Tipos de especificaciones ingenieriles

Performance funcional	Flujo de energía	Ciclo de vida	Distribución al cliente
	Flujo de información		Mantenibilidad
	Flujo de materiales		Capacidad de diagnóstico
	Pasos operacionales		Capacidad de prueba
	Secuencia operacional		Reparabilidad
Factores humanos	Apariencia		Limpieza
	Fuerzas y control del movimiento		Instalabilidad
	Facilidad de control y sensado		Retirada
Requerimientos físicos	Propiedades físicas		Tiempo
	Espacio disponible		Costo
Confiabilidad	Tiempo medio entre fallas	Recursos	Capital
	Seguridad		Unidad
Requerimientos de ensamblaje y manufactura	Materiales		Equipamiento
	Cantidades		Estándares
	Capacidad de la compañía		Medio ambiente

Se pueden considerar los siguientes lineamientos para dar con buenas especificaciones:

- Cada especificación debe medir al menos un requerimiento con relación fuerte del cliente, aunque idealmente deberían medir a más de uno.
- Cada especificación debe ser medible (mediante alguna unidad o magnitud específica), de lo contrario está mal planteada y debería ser reformulada.
- Si las unidades no están claras, la especificación tampoco.
- Si el sentido \uparrow (más es mejor) o \downarrow (menos es mejor) no es obvio entonces la especificación no está clara.
- Si una especificación trata de medir algo cualitativo se deberá transformar a algo medible mediante una escala relativa (por ejemplo, del 1 al 5).

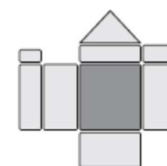
A continuación, se presentan las especificaciones que requerirá el dispositivo:

Tabla 3 Especificaciones ingenieriles requeridas por el dispositivo

Performance funcional	Alimentación a 9Vdc	V	
	Tiempo en el que se realiza el ajuste estabilizador	\downarrow	seg
Factores humanos	Rápida y fácil instalación e implementación	\downarrow	min
Requerimientos físicos	Carga de 600 N axial	N	
	Mecanismo y unidad motora restringido a 20x55x90mm	mm ³	
Confiabilidad	Tiempo alto entre fallas	\uparrow	meses
Ensamblaje y manufactura	Partes obtenibles fácilmente en el mercado	\uparrow	#
	Uso de manufactura aditiva según sea conveniente	\downarrow	cm ³
Ciclo de vida	Tiempo entre mantenimientos/limpiezas	\uparrow	meses
	Rápido y fácil reemplazo de piezas	\downarrow	min
Recursos	Costo accesible	\downarrow	\$

4.1.6 De requerimientos de los clientes a especificaciones ingenieriles ¿Cómo se mide el qué?

Este paso llena la parte central del diagrama el cual representa el nivel de relación de una especificación con respecto a más de un requerimiento mediante los siguientes símbolos o números:



- = 9 = relación fuerte
- = 3 = relación media
- △ = 1 = relación débil
- = 0 = ninguna relación

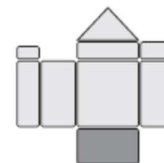
Se presentan lineamientos para la asignación de estos valores:

- Cada requerimiento debe tener al menos una especificación con una relación fuerte.
- Cada especificación debería medir más de un requerimiento.

- Si un requerimiento solo tiene relaciones medias o débiles entonces este no está del todo bien entendido, por lo tanto, debe especificarse de una manera más profunda que tal vez requiera dividir este requerimiento en partes más pequeñas.

4.1.7 Objetivos e importancia de las especificaciones ingenieriles ¿Hasta cuánto es suficientemente bueno?

Se establecen en este paso los objetivos o metas y cómo se alcanzarán los mismos en tres pasos:



4.1.7.1 Importancia de la especificación

Si una meta es importante entonces se necesita invertir esfuerzo para alcanzarla, si no es importante, el esfuerzo puede ser menor. Por lo tanto, se necesita cuantificar la importancia de la siguiente manera:

1. Por cada cliente (apartado 4.1.1) se multiplica su respectivo peso (apartado 4.1.3) por los valores de nivel de relación (apartado 4.1.6) para obtener los valores de ponderación.
2. Se suman los valores de ponderación recientemente obtenidos por cada especificación y así obtener su puntuación
3. Normalizar las sumas para todas las especificaciones, es decir, expresarlas en porcentaje siendo el 100% la suma de todas las puntuaciones de las especificaciones.

4.1.7.2 Medición de cuán bien la competencia alcanza las especificaciones

A diferencia del apartado 4.1.6, en esta etapa se evaluarán los productos de la competencia en relación a las especificaciones ingenieriles. De esta manera se asegura de que tanto el conocimiento como el equipamiento necesario para desarrollar un nuevo producto existan en el proyecto.

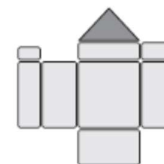
Las mediciones obtenidas brindarán una base para el establecimiento de las metas u objetivos. Estas pueden ser reemplazadas por simulaciones y/o literatura que tengan los valores específicos necesarios que el equipo de diseño requiera.

4.1.7.3 Objetivos de las especificaciones

Objetivos definidos casi al final del proceso de diseño son fácilmente alcanzables ya que siempre concuerdan con lo diseñado, por otro lado, si los objetivos son demasiado estrictos en tiempo y/o requerimientos estos pueden eliminar nuevas y provechosas ideas. Por ende, de manera general, el colocar objetivos se trata de administrar y compensar los unos con respecto a los demás para lograr un balance del diseño y sus especificaciones. Cabe resaltar que algunos objetivos son flexibles y otros no lo son para nada (especificaciones que de no ser alcanzadas hacen al diseño inservible).

4.1.8 Relaciones entre las especificaciones ingenieriles ¿Cuan dependientes son entre sí?

Conforme se va avanzando en alcanzar un objetivo de determinada especificación, esta puede tener efectos positivos o negativos sobre las demás especificaciones.



4.2 Diseño conceptual de elementos

4.2.1 Unidad Motora

En el mercado existen dos tipos de unidades motoras con la capacidad de hacer movimientos precisos de su rotor, estas son los servomotores y los motores paso a paso. Estos primeros, servomotores, quedan descartados ya que su unidad de control electrónico (driver) son de dimensiones prohibitivas para el diseño del mecanismo por lo que los motores paso a paso se convierten en la alternativa viable para la implementación en el prototipo sobre todo porque los drivers que controlan dichos motores existen en el mercado como pequeños módulos diseñados para un fácil uso con el protoboard.

La condición específica del dispositivo con respecto a la restricción de su tamaño rápidamente reduce drásticamente la cantidad de opciones a solo dos. El tamaño de los motores paso a paso está dado por la norma NEMA acompañado de un número que especifica su tamaño, mas no sus dimensiones. Las dos opciones son los motores paso a paso NEMA 8, con 20mm por lado, y NEMA 11, con 28 mm por lado.



Figura 17. Motor paso a paso de norma NEMA.

4.2.2 Resorte

Este elemento va a reemplazar al juego de resortes de tensión que convencionalmente están instalados en las guitarras con puente flotante y que ocupan muy buena parte de la cavidad fresada en la parte posterior del instrumento.

Con el objetivo de optimizar el espacio y siguiendo el ejemplo del Floyd Rose X (ver figura 8) la decisión de diseño de usar un resorte de compresión en reemplazo del juego de resortes de tensión se hace más que obvia.

El diámetro exterior de dicho resorte de compresión tiene que poseer un valor de entre 20 mm aproximadamente para que cumpla con la restricción del espacio. También debería tener una longitud libre de menos de 40 mm.

Una razón importante por la que se ha escogido este tipo de resorte es que su regulación es sencilla como lo demuestra la industria de la suspensión automotriz. Un tornillo de potencia con un enjaulado del resorte hace esto posible. Esto quiere decir que el resorte deberá estar enjaulado y esta jaula deberá permitir acoplarse con un tornillo de potencia y a la vez estar libre para moverse linealmente y permitir la regulación efectiva de la longitud de operación del resorte.

El elemento que va a conectar físicamente el resorte con el bloque de metal del puente flotante puede ser asumido por un perno cuyo cuerpo cilíndrico sea de una dimensión menor al diámetro interno del resorte. El largo de dicho perno puede ser ajustado maquinándolo.

La jaula por razones de accesibilidad de materiales deberá ser un tubo metálico de fácil acceso en el mercado para no encarecer el dispositivo en su conjunto. Una arandela previamente maquinada para las dimensiones del tubo tendrá que ser soldada a uno de los extremos para que actúe como el piso del resorte y además deje pasar la tuerca que va a conectar el resorte con el puente flotante.

4.2.3 Tornillo de potencia

La implementación del movimiento lineal esperado en el dispositivo se consigue usando un tornillo con su respectiva tuerca. Un juego de tornillo y tuerca de 1/8 pulgada hará bien el trabajo.

En un juego de tornillo tuerca un elemento deberá girar recibiendo el par de fuerzas de la unidad motora, en este caso motor paso a paso, mientras que el otro exhibirá un movimiento lineal. En el diseño se consideró que el tornillo deberá ser el elemento con movimiento rotativo mientras que la tuerca permitirá trasladar el movimiento rotativo del tornillo a uno lineal para mover la jaula que alberga al resorte.

La manera de acoplar la tuerca a la jaula es mediante la implementación de una especie de tapa para la jaula, en dicha tapa se colocará la tuerca y permitirá el libre movimiento lineal del conjunto de la jaula del resorte. Esta tapa deberá soportar la fuerza axial de la carga aplicada generada por las cuerdas de la guitarra sometidas a tensión y también deberá presentar facilidad para tapar y destapar la jaula. Esto se logra quitando material del extremo del tubo en donde irá la tapa logrando tres cortes en “L” equidistantes alrededor de la circunferencia para que la tapa pueda introducirse con facilidad en la jaula y para fijarla en su sitio se gire un poco usando los cortes quedando fijada y con la capacidad de soportar la carga axial sin destaparse.

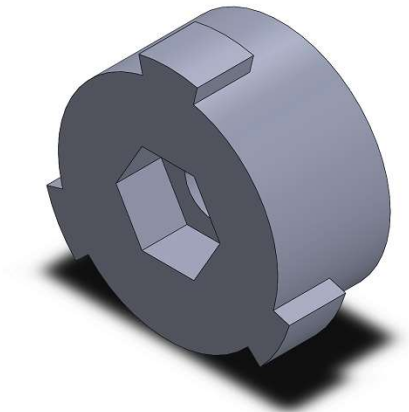


Figura 18. Vista isométrica de la tapa del portaresorte.



Figura 19. Portaresorte o jaula que alberga al resorte.

4.2.4 Transmisión de potencia

Otra vez la restricción de tamaño y de materiales disponibles en el mercado prácticamente limita las opciones a una sola: poleas y correas síncronas. Se necesitarán dos poleas síncronas (idénticas debido a que solo un tipo cumple con la restricción de tamaño) con su respectiva banda síncrona. Dicho juego de poleas y banda se encuentra en el mercado con el código de “GT-2” los cuales son usados primordialmente en impresoras 3D para la transmisión mecánica de sus respectivos ejes.



Figura 20. Polea sincrónica GT-2.

Una polea irá acoplada al motor mientras que la otra estará acoplada de manera fija al tornillo formando, de manera práctica, en un solo elemento.

Para permitir un funcionamiento lo más libre de fricción en el dispositivo se implementarán rodamientos en los siguientes puntos:

- Un rodamiento radial DIN 635 (16mm de diámetro exterior) que permitirá al elemento de tornillo polea girar libremente y mantenerlo en la posición deseada de la bancada.



Figura 21. Rodamiento o cojinete radial DIN 635.

- Dos rodamientos lineales FF2010 que asegurarán el suave movimiento de la jaula del resorte. Estarán colocados dentro de la bancada.



Figura 22. Rodamiento lineal FF2010.

La implementación del movimiento lineal esperado en el dispositivo se consigue usando un tornillo con su respectiva tuerca. Un juego de tornillo y

4.2.5 Bancada

Una bancada general para colocar todos los elementos es necesaria, después de varias iteraciones en el diseño se llegó con el siguiente:

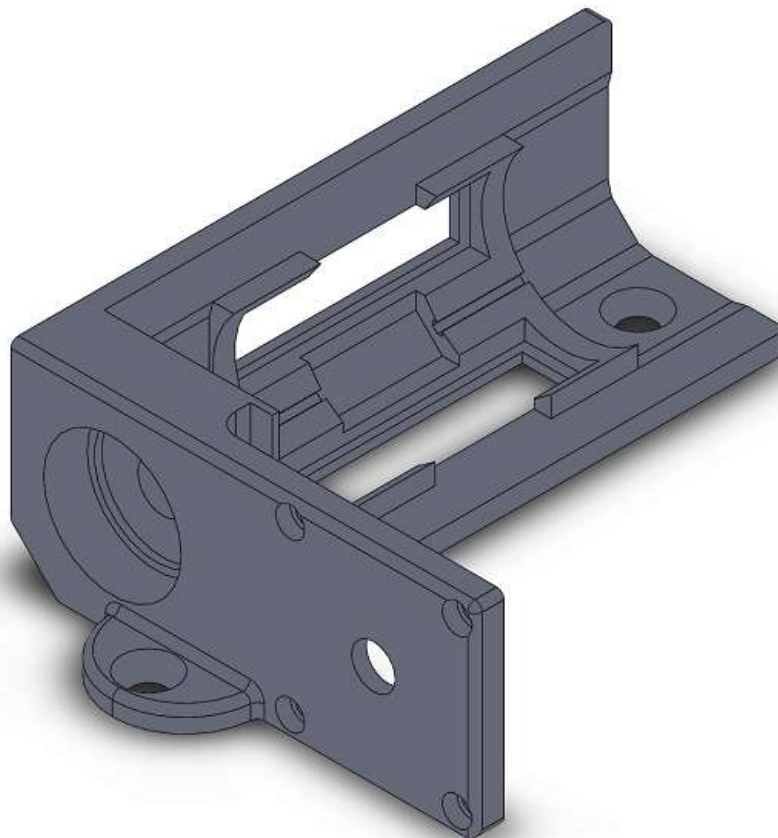


Figura 23. Vista isométrica de la bancada del dispositivo.

Debido a la complejidad y tamaño del elemento una buena opción para manufacturarlo sería el empleo de manufactura aditiva (impresión 3D).

Este elemento junto con los elementos de potencia ocupará la totalidad de la cavidad trasera de la guitarra.

4.2.6 Algoritmo

Para el gobierno del control electrónico del dispositivo se escogió a la plataforma Arduino debido a sus amplias ventajas y disponibilidad en el mercado.

Se presenta un diagrama de flujo que representa a la lógica a cargar en el microcontrolador.

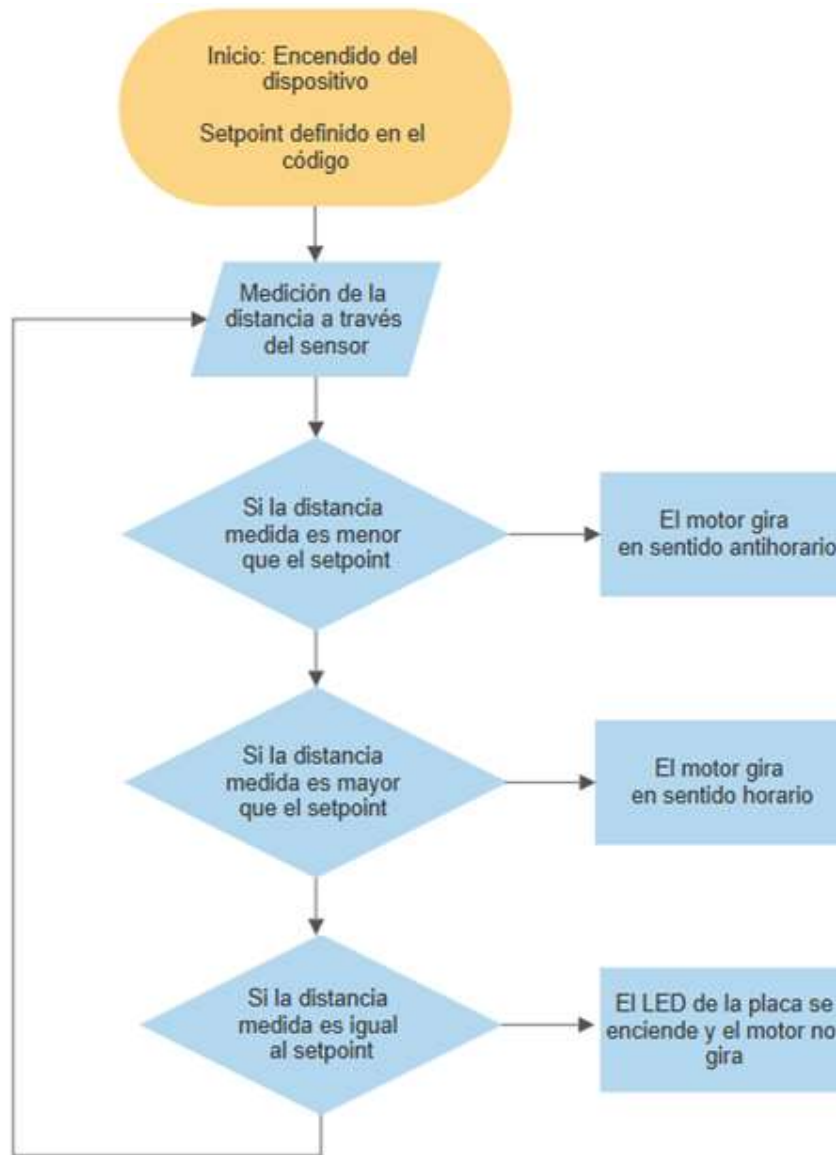


Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo a cargar en el microcontrolador.

Este diagrama de flujo expresado en el boceto o sketch en el IDE de Arduino es el que se presenta a continuación:

```

1 #include<Wire.h> // Bibliotecas del sensor y
2 #include<VL53L0X.h> // motor necesarias para
3 #include <Stepper.h> // el presente algoritmo
4
5 const int stepsPerRevolution = 200; // Cantidad de pasos por revolución del motor
6 const int sp = 69; // Setpoint (en mm)
7 const int sens=1; // Sensibilidad del sensor (en mm)
8 const int n=10; // Pasos por lectura
9 const int rpm=200; // Velocidad angular del motor (RPM)
10
11 // Inicializar la librería del motor en los pines 8 a 11
12 Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);
13
14 // Inicializar la librería del sensor
15 VL53L0X sensor1;
16
17 // Sensor configurado para alta precisión
18 #define HIGH_ACCURACY
19
20 void setup() {
21
22     Serial.begin(9600);
23     Wire.begin();
24
25     sensor1.init();
26     sensor1.setTimeout(500);
27
28     #if defined LONG_RANGE
29     // lower the return signal rate limit (default is 0.25 MCPS)
30     sensor.setSignalRateLimit(0.1);
31     // increase laser pulse periods (defaults are 14 and 10 PCLKs)
32     sensor.setVcselPulsePeriod(VL53L0X::VcselPeriodPreRange, 18);
33     sensor.setVcselPulsePeriod(VL53L0X::VcselPeriodFinalRange, 14);
34 #endif
35
36 #if defined HIGH_SPEED
37 // reduce timing budget to 20 ms (default is about 33 ms)
38     sensor.setMeasurementTimingBudget(20000);
39 #elif defined HIGH_ACCURACY
40 // increase timing budget to 200 ms
41     sensor1.setMeasurementTimingBudget(200000);
42 #endif
43
44 // LED de la tarjeta configurada como salida
45 pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
46
47 // Definiendo la velocidad angular del motor
48 myStepper.setSpeed(rpm);
49 }
50
51 void loop() {
52
53 // Definiendo "dist" como la longitud medida por el sensor
54 int dist = sensor1.readRangeSingleMillimeters();
55
56 // Si la distancia medida es mayor que el setpoint el motor
57 // gira "n" pasos en sentido horario
58 if(sp+sens<dist){
59     myStepper.step(n) ;
60     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
61
62 }
63
64 // Si la distancia medida es menor que el setpoint el motor
65 // gira "n" pasos en sentido antihorario
66 else if(sp-sens>dist){
67     myStepper.step(-n) ;
68     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
69
70 }
71
72 // Si la distancia medida es igual al setpoint mas/menos la
73 // sensibilidad el LED se enciende y el motor no gira
74 else if(sp-sens<dist<sp+sens){
75     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
76     delay(500);
77 }
78
79 }

```

Figura 25. Sketch o boceto del algoritmo a cargar en el microcontrolador mostrado en el IDE de Arduino

4.2.7 Control electrónico

Como se mencionó en el anterior apartado se trabajará con la plataforma Arduino, específicamente con la tarjeta Arduino Pro Mini 328 – 5v/16MHz.

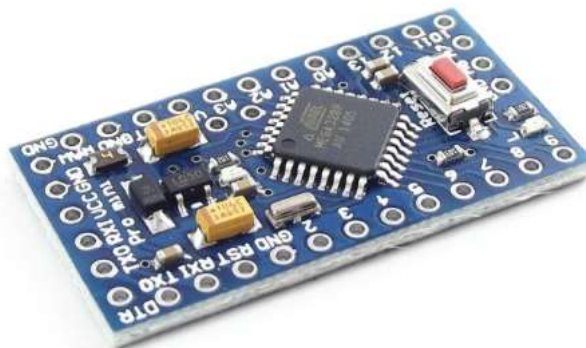


Figura 26. Microcontrolador Arduino Pro Mini 328 – 5v/16MHz.

Las reducidas dimensiones y la funcionalidad completa de esta tarjeta la hacen la mas adecuada para la aplicación de este presente documento.

Esta tarjeta recibirá información del sensor de distancia, del cual el espacio disponible reduce las opciones disponibles en el mercado a una sola. Se trata de una tarjeta en la cual funciona un interferómetro que gracias a un laser que cada cierto tiempo emite un haz de luz que al encontrarse con un objeto esta luz es reflejada, el sensor se encarga de medir el tiempo entre la emisión y la detección de la luz y como la velocidad de la luz es un valor conocido entonces se puede calcular la distancia al objeto con el tiempo de vuelo.

En el mercado el sensor de distancia responde al nombre de VL53L0X y su laser es totalmente invisible al ojo humano, además posee óptica con filtros anti-infrarrojo.

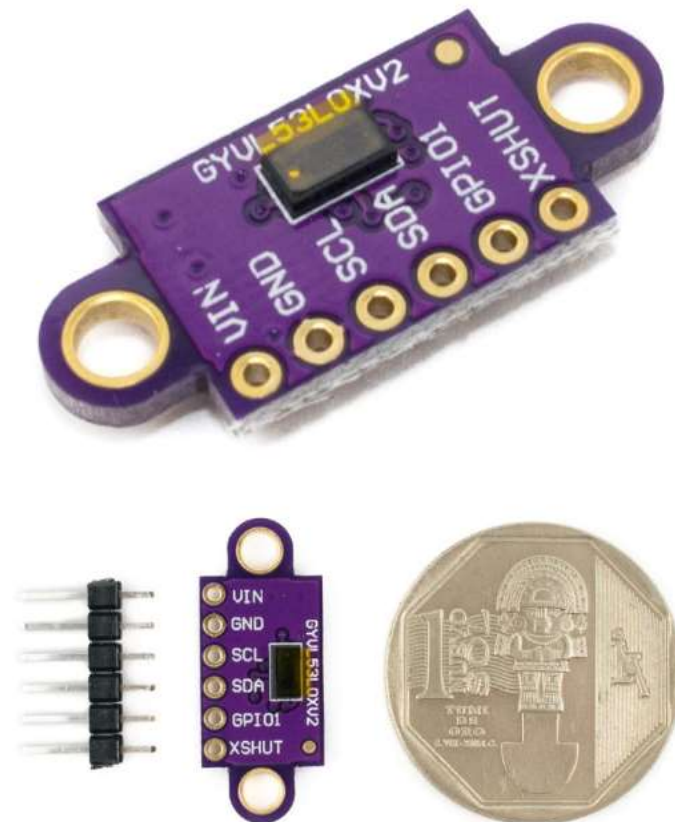


Figura 27. Sensor de distancia VL53L0X.

Una vez recibida y procesada la información de la distancia , en mm, se tiene que ordenar al actuador, el motor paso a paso, que realice o no un movimiento horario o antiorario de su eje. Los motores gobernados por un controlador necesitan de un driver que es aquella tarjeta que recibe las ordenes digitales del microcontrolador y las convierte en ordenes de potencia que sirven para mover el eje del motor según se desee.

Para la selección del driver se toma en cuenta de los parámetros del motor a controlar, es decir de los motores paso a paso NEMA 8 y 11, los cuales funcionan con una corriente por fase de 0.6 A o 600mA. Teniendo en cuenta estos parámetros se optó por usar el driver L9110S que es capaz de controlar dos motores de hasta 800mA de corriente directa o un motor paso a paso con hasta 800mA de corriente por fase.

V. RESULTADOS

5.1 Definición de características

La primera característica a determinar es la carga con la cual se lidiará, es decir, cuanta fuerza producen las cuerdas afinadas para así poder corroborar la selección del motor del apartado 4.2.1. usando los parámetros del tornillo.

Como fue expuesto en el apartado 2.2.1.1 a través de la ecuación (xi) para determinar la fuerza o tensión a la que es sometida una cuerda afina es necesario conocer la masa por unidad de longitud de la cuerda, la frecuencia de la nota a la cual está afinada y la longitud vibrante de la cuerda (dada por la escala del instrumento). A continuación, se presenta una tabla con las frecuencias de las notas musicales.

Tabla 5 Frecuencia de las notas musicales

Nota	Frecuencia (Hz)			
	1° Octava	2° Octava	3° Octava	4° Octava
C	32.7	65.41	130.81	261.63
C#	34.65	69.3	138.59	277.18
D	36.71	73.42	146.83	293.66
D#	38.89	77.78	155.56	311.13
E	41.2	82.41	164.81	329.63
F	43.65	87.31	174.61	349.23
F#	46.25	92.5	185	369.99
G	49	98	196	392
G#	51.91	103.83	207.65	415.3
A	55	110	220	440
A#	58.27	116.54	233.08	466
B	61.74	123.47	246.94	493.88

Se presenta una tabla basada en un documento provisto por el fabricante de cuerdas D'Addario que provee la información de la densidad por unidad de longitud de la cuerda según su calibre (diámetro exterior) y según si es o no una cuerda entorchada.

Tabla 6 Densidad por unidad de longitud de cuerdas de guitarra según su calibre. [35]

NO ENTORCHADAS			ENTORCHADAS		
Calibre (in)	μ (lb/in)	μ (kg/m)	Calibre (in)	μ (lb/in)	μ (kg/m)
0.007	0.00001085	0.000193759	0.017	0.00005524	0.000986474
0.008	0.00001418	0.000253226	0.018	0.00006215	0.001109873
0.0085	0.00001601	0.000285906	0.019	0.00006947	0.001240593
0.009	0.00001794	0.000320372	0.020	0.00007495	0.001338454
0.0095	0.00001999	0.000356981	0.021	0.00008293	0.001480961
0.010	0.00002215	0.000395554	0.022	0.00009184	0.001640075
0.0105	0.00002442	0.000436092	0.024	0.00010857	0.001938839
0.011	0.00002680	0.000478593	0.026	0.00012671	0.002262783
0.0115	0.00002930	0.000523238	0.028	0.00014666	0.002619049
0.012	0.00003190	0.000569669	0.030	0.00017236	0.003077999
0.013	0.00003744	0.000668602	0.032	0.00019347	0.00345498
0.0135	0.00004037	0.000720926	0.034	0.00021590	0.003855535
0.014	0.00004342	0.000775393	0.036	0.00023964	0.004279483
0.015	0.00004984	0.000890041	0.038	0.00026471	0.004727182
0.016	0.00005671	0.001012725	0.039	0.00027932	0.004988087
0.017	0.00006402	0.001143267	0.042	0.00032279	0.005764372
0.018	0.00007177	0.001281666	0.044	0.00035182	0.006282789
0.019	0.00007997	0.001428101	0.046	0.00038216	0.0068246
0.020	0.00008861	0.001582394	0.048	0.00041382	0.007389983
0.022	0.00010722	0.001914731	0.049	0.00043014	0.007681425
0.024	0.00012760	0.002278676	0.052	0.00048109	0.008591288
0.026	0.00014975	0.00267423	0.054	0.00053838	0.009614371
			0.056	0.00057598	0.010285831
			0.059	0.00064191	0.011463206
			0.060	0.00066542	0.011883047
			0.062	0.00070697	0.012625045
			0.064	0.00074984	0.013390616
			0.066	0.00079889	0.01426655
			0.068	0.00084614	0.015110338
			0.070	0.00089304	0.015947877
			0.072	0.00094124	0.016808631
			0.074	0.00098869	0.017655991
			0.080	0.00115011	0.020538624

5.2 Cálculos justificativos

Con los datos de las dos últimas tablas mostradas y con la ayuda de una hoja de cálculo es posible determinar la fuerza generada por las cuerdas en una determinada afinación. Para demostrarlo se presentan tablas describiendo las fuerzas para afinaciones estándar de guitarras de 6 y de 7 cuerdas.

Tabla 7 Hoja de cálculo usada para determinar la fuerza generada por la afinación estándar de una guitarra de 6 cuerdas

# cuerda	Nota	Calibre (in)	Frecuencia (Hz)	μ (kg/m)	Longitud de la escala		Tensión (N)	Σ Tensiones (N)
1°	E4	0.0090	329.63	0.000320372	25.5	in	58.41	378.66
2°	B3	0.0110	246.94	0.000478593			48.97	
3°	G3	0.0160	196	0.001012725			65.28	
4°	D3	0.0240	146.83	0.001938839			70.14	
5°	A2	0.0320	110	0.00345498	0.6477	m	70.15	
6°	E2	0.0420	82.41	0.005764372			65.69	

Tabla 8 Hoja de cálculo usada para determinar la fuerza generada por la afinación estándar de una guitarra de 7 cuerdas

# cuerda	Nota	Calibre (in)	Frecuencia (Hz)	μ (kg/m)	Longitud de la escala		Tensión (N)	Σ Tensiones (N)
1°	E4	0.0090	329.63	0.000320372	25.5	in	58.41	433.61
2°	B3	0.0110	246.94	0.000478593			48.97	
3°	G3	0.0160	196	0.001012725			65.28	
4°	D3	0.0240	146.83	0.001938839			70.14	
5°	A2	0.0320	110	0.00345498	0.6477	m	70.15	
6°	E2	0.0420	82.41	0.005764372			65.69	
7°	B1	0.0520	61.74	0.008591288			54.95	

Este cálculo realizado corrobora la especificación de diseño de no sobrepasar los 450N de carga y, por tanto, se puede pasar a corroborar la selección de la unidad motora haciendo uso de ciertos parámetros geométricos del tornillo especificado en el apartado 4.2.3. Este cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9 Hoja de cálculo usada para determinar el torque mínimo que la unidad motriz deberá entregar

	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
ENTRADA	Diámetro mayor del tornillo	d	3.175	mm
	Carga axial unidireccional a soportar	F_{cuerdas}	450	N
	Longitud de paso del tornillo	p	1.25	mm
	Longitud total del tornillo	Lt	6	cm
	Ángulo de la rosca	α	25	°
	Ángulo de la hélice	ψ	85	°
	Paso angular del motor	ϕ_p	1.8	°
	Coefficiente de fricción (acero-acero)	f	0.1	
SALIDA	Diámetro de paso del tornillo	d_{pt}	2.7608	mm
	Diámetro menor o de raíz del tornillo	d_{rt}	2.3466	mm
	Altura de la rosca	h_s	0.8284	mm
	Ángulo de avance del tornillo	λ	5	°
	Longitud de avance en una revolución	L	0.7588	mm
	Parámetro geométrico	β	0.9063	
	Torque necesario para elevar la carga	T_R	0.12	N.m
	Torque necesario para descender la carga	T_L	0.01	N.m
	Eficiencia mecánica del tornillo	η	0.4380	

Al comparar el torque sombreado en color verde con el anexo respectivo en donde se encuentran las especificaciones técnicas de los motores paso a paso se concluye que la unidad motora idónea para la presente aplicación es el motor NEMA 11 y por tanto la bancada tiene que ser específica para sus dimensiones geométricas.

VI. SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Verificación del cumplimiento de los parámetros de diseño

Esta verificación se hará a través de los requerimientos del dispositivo mostradas en el apartado 4.1.5.

- Alimentación a 9Vdc
Se escogió este nivel de voltaje ya que es común que las guitarras con circuitos activos lleven una batería de 9V para alimentar sus circuitos y como se puede confirmar en el apartado 4.2.7 los elementos electrónicos se pueden alimentar con 5Vdc por lo que el uso de un regulador de voltaje es suficiente para proveer al dispositivo con los niveles de tensión adecuados.
- Tiempo en el que se realiza el ajuste estabilizador
El control y actuación electrónica permiten realizar los cambios milimétricos de manera rápida y eficiente. Altamente dependiente del tipo de ajuste que se realice.
- Rápida y fácil instalación e implementación
El dispositivo está diseñado con una bancada a la cual se fija en su posición final y se le ensamblan los elementos motrices y de transmisión de potencia haciendo uso de herramientas básicas como el destornillador.
- Carga de 450 N axial
Se corroboró en el apartado 5.2 que las afinaciones estándar para guitarras de 6 y 7 cuerdas no sobrepasan la carga de diseño de 450 N.
- Mecanismo y unidad motora restringido a 20x55x90mm
Como se muestra en los anexos respectivos a los planos de la bancada y debido a la no disponibilidad de elementos motrices y de transmisión de potencia lo suficientemente pequeños la dimensión del mecanismo y la unidad motora sobrepasa mínimamente a la restricción de diseño por lo que en la implementación del primer prototipo se necesitará de una cavidad trasera ligeramente mayor. Este inconveniente es evitable si se usan elementos customizados en su totalidad con el resultado en el incremento del costo total del dispositivo o en su defecto un nuevo diseño de un instrumento que tome en consideración los elementos ya seleccionados para el dispositivo.
- Tiempo alto entre fallas
Se ha provisto de elementos que reducen la fricción mecánica por lo que se logra teóricamente aumentar el tiempo de ocurrencia entre fallas del dispositivo.
- Partes obtenibles fácilmente en el mercado fácilmente reemplazables y que requieren mínimo mantenimiento y limpieza.

La totalidad de los elementos empleados presentan una disponibilidad muy buena en el mercado y solo a algunos elementos, mencionados en el apartado 4.2.2, es necesario adaptarlos mediante un maquinado mínimo para su uso en el contexto del dispositivo. Esto sumando a la consideración de que es dispositivo estará cubierto por una tapa protectora hará que los tiempos entre mantenimientos o limpiezas sean prolongados.

- Uso de manufactura aditiva según sea conveniente

En el apartado 4.2.2 y 4.2.5 se mencionaron los elementos de los cuales era necesario el uso de tecnologías de manufactura aditiva para su manufactura.

- Costo accesible

El estándar en la manufactura de hardware de guitarras es el uso de la tecnología de maquinado CNC lo que resulta en un costo de los productos relativamente elevados, considerando que son elementos netamente mecánicos. Por lo que la decisión de usar partes mecánicas y electrónicas fácilmente obtenibles en el mercado contribuirán a mantener el costo bajo considerando que se trata de un dispositivo mecatrónico.

6.2 Implementación

6.2.1 Bancada y cavidad de alojamiento

La cavidad en donde el dispositivo se va a alojar, por razones expuestas en los anteriores apartados, ha tenido que ser expandida a un área rectangular de 110mm x 68mm. La altura del dispositivo de 30mm tiene como consecuencia que el dispositivo sobresalga por sobre la superficie posterior del instrumento por lo cual se necesitará una tapa especial que sobresalga como si de una extrusión del cuerpo del instrumento se tratara.

Conforme al apartado 4.2.5 se decidió que la bancada sea manufacturada mediante algún método de manufactura aditiva o impresión 3D. Existen empresas extranjeras dedicadas a brindar servicios de manufactura aditiva que atienden pedidos particulares especialmente indicados para la manufactura de prototipos. En el presente caso se contrató el servicio de la empresa china FacFox y luego de navegar su web en busca de la tecnología y material adecuados se decidió en usar la tecnología Multi Jet Fusion propiedad de la empresa Hewlett-Packard (HP) la cual usa un tipo de nylon (PA-12) de propiedad también de la misma. Esta tecnología y material son apropiados tanto para prototipos como para productos finales, diseños complejos e intrincados, prototipos funcionales, entre otros. [36]

La bancada será fijada usando dos tornillos de 3.5mm al cuerpo del instrumento a través de dos orificios de 4.51mm de diámetro, los cuales pueden ser identificados en los dibujos técnicos de este elemento en el anexo 10.9 y 10.10.

6.2.2 Portaresorte

Para que el resorte funcione correctamente necesita de los elementos mostrados en las figuras 18 y 19. Se vio conveniente que la tapa portaresorte (figura 18) que sea manufacturada a través de la misma tecnología usada con la bancada.

Respecto a que el elemento tubular (figura 19) va a albergar el resorte, y por tanto soportar directamente las cargas ejercidas por las cuerdas y el puente del instrumento (la tapa portaresorte tiene una cavidad para encajar una tuerca cuyo hilo va a ser el que va a trasladar la fuerza hacia el rodamiento radial por medio del tornillo de potencia), se concluyó que lo más conveniente era la selección de un material metálico para este elemento. Debido a que este elemento va a estar en contacto con los rodamientos lineales es también una necesidad que su superficie ofrezca poca fricción contra los mismos.

Otro de los accesorios más populares que se usan para la ejecución de la guitarra, especialmente en géneros como el blues, country, entre otros, es el *slide*. Este elemento es un tubo que puede ser de metal, cerámica o cristal que se ejecuta como se ve en la figura 28. Los slides metálicos al ser herramientas que van a estar en contacto constante con la mano y el sudor que esta produce tiene que estar compuesta de un metal con alta resistencia a la corrosión y oxidación como puede ser el bronce o el acero inoxidable.



Figura 28. Un slide en uso.

Se ha logrado manufacturar el portaresorte al maquinar un slide de acero inoxidable y soldarle una arandela maquinada del mismo material. En la figura 29 se ven las dos piezas ya maquinadas antes y después de ser soldadas.



Figura 29. Portaresorte de acero inoxidable.

6.2.3 Transmisión de potencia

Una vez ya teniendo el tornillo de potencia ensamblado con el conjunto del portaresorte solo queda conectar esos elementos con el motor paso a paso NEMA11 vía un conjunto de poleas y correa sincrónica GT-2. Las correas o bandas sincrónicas GT-2 y similares son comercializadas por metro lo que hace necesario el uso de pegamentos resistentes para unir ambos extremos.

Para el presente diseño se ha hecho uso de una correa sincrónica GT-2 con 56 pasos.

6.2.4 Electrónica y control del dispositivo

Conforme con el apartado 4.2.7 son 3 los módulos electrónicos a usarse en el dispositivo: el sensor de distancia a ubicarse en la bancada (figura 30) y los dos restantes en una placa de circuito impreso perforada en donde las conexiones se harán de manera manual usando conductores aislados (figura 31).

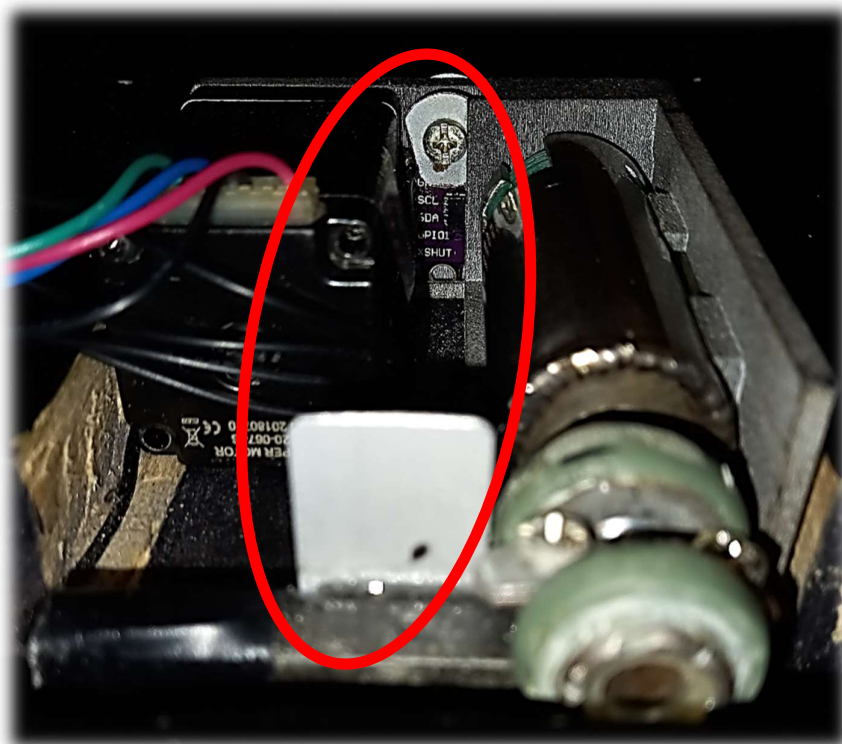


Figura 30. Sensor de distancia en ensamblado en la bancada.

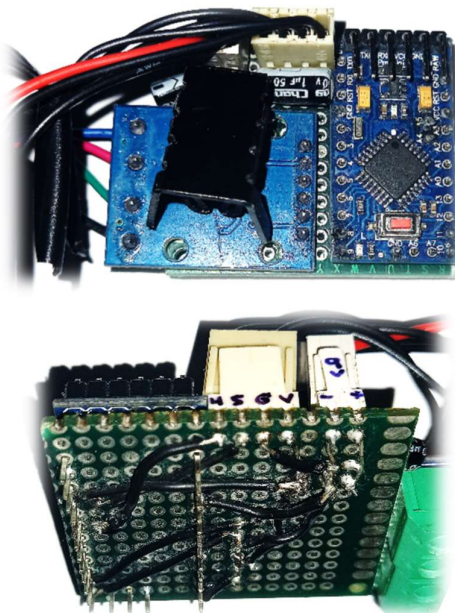


Figura 31. Circuito de control electrónico del dispositivo.

La placa donde va a alojarse el microcontrolador y el driver del motor estará alojada en la cavidad que el instrumento dispone para sus controles electrónicos (figura 32) y esta se va a comunicar con el sensor, el switch ON/OFF y la batería de 9V mediante conectores molex para placas de circuitos impresos. El switch ON/OFF del dispositivo va a estar ubicado en la misma superficie donde se acceden a los demás controles propios del instrumento, el cual además tendrá un indicador LED para indicar el estado de funcionamiento del dispositivo (figura 33).



Figura 32. Cavidad del instrumento en donde se aloja la electrónica del mismo además del circuito del dispositivo propuesto recubierto en cinta aislante.

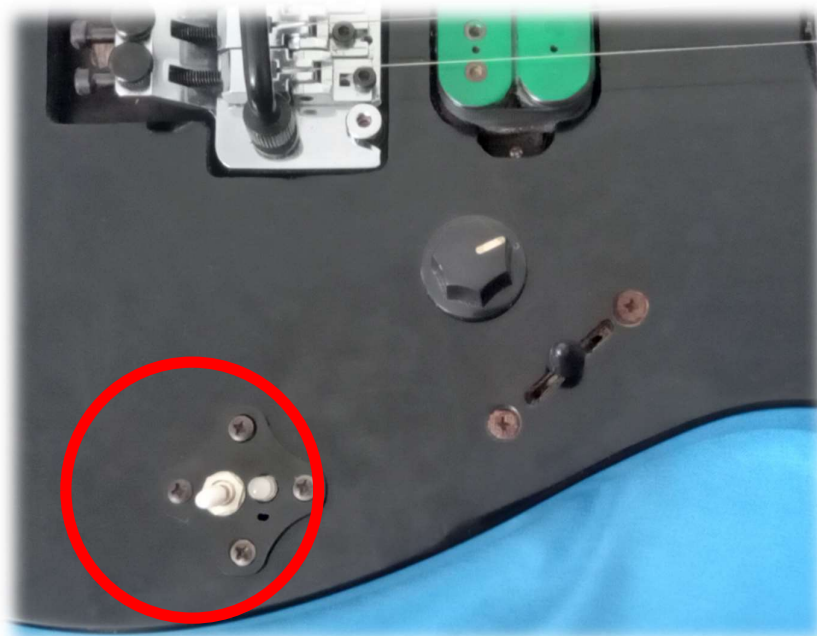


Figura 33. Control e indicador del estado de funcionamiento del dispositivo.

La batería va a estar ubicada dentro de la tapa especial para el dispositivo (figura 34) aprovechando el volumen de esta, en primera instancia indeseado, para de esta manera evitar hacer más cavidades en el instrumento en donde el dispositivo va a implementarse.

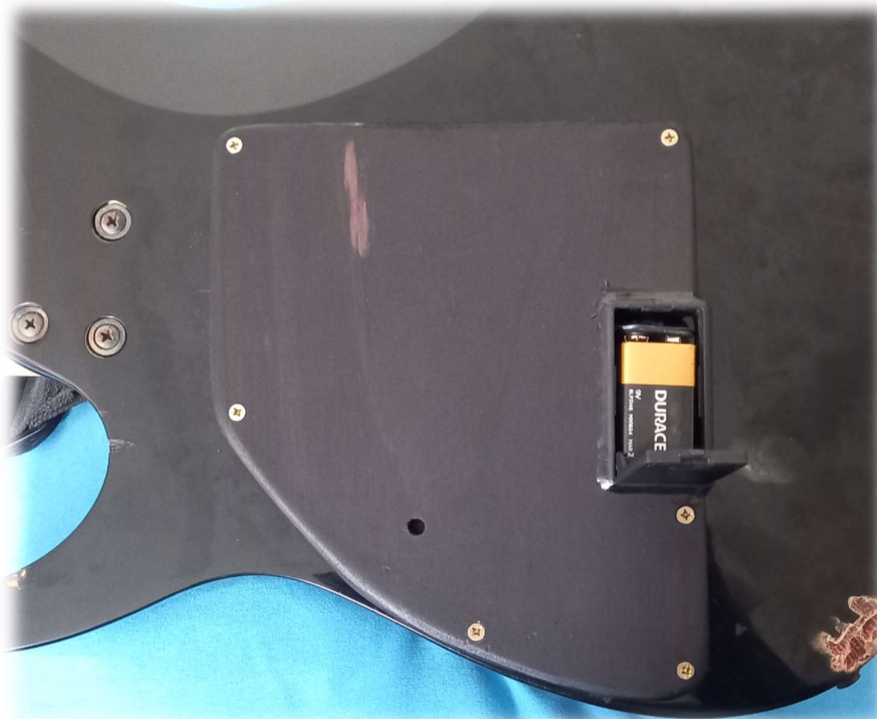


Figura 34. Alojamiento de la batería en la tapa trasera.

6.2.5 Ensamble

Con los elementos del dispositivo ya ensamblados entre sí, solo queda el ensamble para con el puente del instrumento.

En el apartado 4.2.2 se decidió usar un perno para conectar el resorte con el bloque trasero del puente. Se usó un perno de 3/8" a cuya cabeza se le ha colocado un elemento impreso en 3D para estabilizar el contacto con el resorte. Respecto al contacto con el puente se ha convenido en usar dos conjuntos de tuercas con arandelas unidos por una masilla moldeable para la fijación tuerca-arandela en un solo elemento (figura 35).

Debido a que el arreglo conseguido solo lograba mantener el ensamble cuando no hay carga, se consideró necesario usar dos pernos de 3mm de diámetro para fijar el perno de 3/8" (en una zona previamente amolada sobre la cual las arandelas modificadas de 3mm puedan descansar) y así obtener un ensamble robusto cuando las cargas estén actuando (figura 36).



Figura 35. Resorte y perno de 3/8" y arandelas modificados.

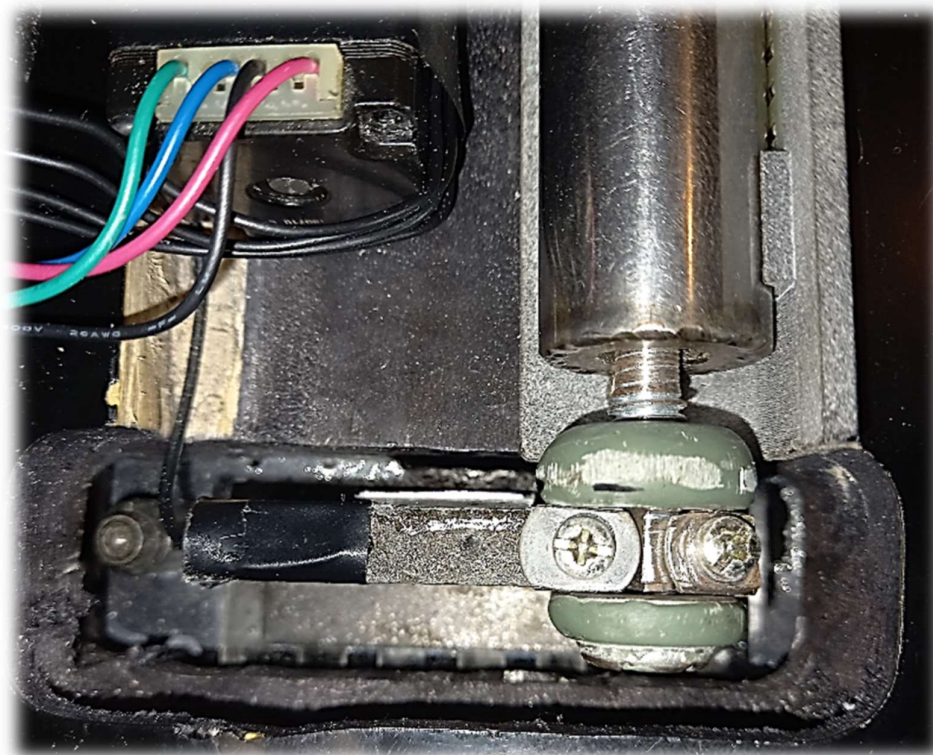


Figura 36. Ensamble robusto del dispositivo con el puente flotante del instrumento.

6.3 Verificación cuantitativa

6.3.1 Prueba de cambio de afinación

Conforme con el último de los objetivos específicos se va a comparar el tiempo que le toma al dispositivo propuesto realizar el ajuste de posición del puente versus un instrumento implementado con un puente flotante convencional en el contexto específico de un cambio de afinación del mismo.

Una de las limitaciones para la realización de esta prueba es la incertidumbre respecto a los tiempos con los cuales se va a hacer la comparación. No se encontró ninguna fuente que haya cronometrado este proceso, dejando solo estimaciones a priori que se han podido encontrar en foros online [37] y de la experiencia del autor. El tiempo que tome realizar un cambio de afinación en un sistema convencional de puente flotante es altamente dependiente de la experiencia de quien lo realice y por tanto se van a tomar un valor mínimo (10 min) y un valor máximo (20 min).

Cabe destacar que ambas situaciones a comparar no corresponden a situaciones análogas ya que el dispositivo propuesto sí permite ajustar la afinación sin la necesidad de salir de la posición de ejecución del instrumento.

La presenta prueba se ha documentado en un clip de video [38] en el cual a cada una de las cuerdas del instrumento (guitarra de 7 cuerdas) se le reducen un semitono, llevándolo desde la afinación e-B-G-D-A-E-B hacia d#-A#-F#-C#-G#-D#-A# (ver anexo 10.11 para referencia respecto a las notas y la tabla 9 para las afinaciones) lo cual le toma al ejecutante, usando el dispositivo, el tiempo de 01:32:20 (1 minuto con 32 segundos y 20 centésimas de segundo).

Tabla 10. Comparación entre las dos afinaciones

	# cuerda	Nota	Calibre (in)	Frecuencia (Hz)	μ (kg/m)	Longitud de la escala		Tensión (N)	Σ Tensiones (N)
Std - 7 cuerdas	1°	E4	0.0090	329.63	0.00032037	25.5	in	58.41	433.61
	2°	B3	0.0110	246.94	0.00047859			48.97	
	3°	G3	0.0160	196	0.00101273			65.28	
	4°	D3	0.0240	146.83	0.00193884			70.14	
	5°	A2	0.0320	110	0.00345498	0.6477	m	70.15	
	6°	E2	0.0420	82.41	0.00576437			65.69	
	7°	B1	0.0520	61.74	0.00859129			54.95	

	# cuerda	Nota	Calibre (in)	Frecuencia (Hz)	μ (kg/m)	Longitud de la escala		Tensión (N)	Σ Tensiones (N)
Std menos un semitono - 7 cuerdas	1°	D#4	0.0090	311.13	0.00032037	25.5	in	52.04	386.30
	2°	A#3	0.0110	233.08	0.00047859			43.63	
	3°	F#3	0.0160	185	0.00101273			58.16	
	4°	C#3	0.0240	138.59	0.00193884			62.49	
	5°	G#2	0.0320	103.83	0.00345498	0.6477	m	62.50	
	6°	D#2	0.0420	77.78	0.00576437			58.52	
	7°	A#1	0.0520	58.27	0.00859129			48.95	

La medición se puede interpretar que, debido al dispositivo propuesto, el tiempo que toma un cambio de afinación se redujo entre 92% y 85% respecto a un puente flotante convencional.

6.3.2 Prueba de rotura de cuerda

Esta prueba, a diferencia de la anterior, no es posible compararla con una situación equivalente de un puente convencional ya que una rotura de cuerda significa sacar de operatividad al puente flotante, y por tanto al instrumento, hasta que se le reemplace la cuerda y se realicen los ajustes debidos. Por ello solo se va a medir el tiempo que le toma al dispositivo entrar a una situación de operatividad provisional que requeriría el ejecutante para tener una oportunidad de terminar una canción en caso de que esta situación adversa ocurra en medio de la performance de una canción.

La prueba registrada en el clip de video [39] consiste en el mismo instrumento en la afinación final de la prueba anterior (d#-A#-F#-C#-G#-D#-A#) al cual se le retira el ajuste al sillín de la tercera cuerda (F#) ocasionando que se desacople del puente para así simular una rotura fortuita de la misma.

Tabla 11. Comparación de las tensiones entre las dos situaciones propuestas

	# cuerda	Nota	Calibre (in)	Frecuencia (Hz)	μ (kg/m)	Longitud de la escala		NORMAL		CUERDA ROTA		Diferencia entre tensiones (N)
								Tensión (N)	Σ Tensiones (N)	Tensión (N)	Σ Tensiones (N)	
Std - 7 cuerdas	1°	E4	0.0090	329.63	0.00032037	25.5	in	58.41	433.61	58.41	368.33	65.28
	2°	B3	0.0110	246.94	0.00047859			48.97		48.97		
	3°	G3	0.0160	196	0.00101273			65.28				
	4°	D3	0.0240	146.83	0.00193884			70.14		70.14		
	5°	A2	0.0320	110	0.00345498	0.6477	m	70.15		70.15		
	6°	E2	0.0420	82.41	0.00576437			65.69		65.69		
	7°	B1	0.0520	61.74	0.00859129			54.95		54.95		

La medición nos muestra que, debido al dispositivo propuesto, el instrumento volvería a una situación de operatividad provisional en un tiempo de 01:13:19 (1 minuto con 13 segundos y 19 centésimas de segundo). Suponiendo que devolverle la operatividad provisional al instrumento con cuerda rota con un sistema convencional toma la misma cantidad de tiempo que un cambio de afinación (entre 10 y 20 minutos), lo cual es bastante plausible, este resultado se puede interpretar que debido al dispositivo el tiempo se redujo entre 94% y 88% respecto a un puente flotante convencional. El pequeño aumento en la reducción respecto a la prueba anterior se puede explicar debido a que hay una cuerda menos que afinar.

VII. CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó e implementó un dispositivo capaz de corregir automáticamente la posición de un puente flotante de una guitarra eléctrica Ibanez RG7321.

Se dimensionó el dispositivo a partir de la tensión generada por las cuerdas del instrumento afinado (menos de 450 N) seleccionando así un tornillo de potencia de 1/8", un microcontrolador Arduino Pro Mini 328 – 5v/16MHz, un sensor de distancia VL53L0X, un motor paso a paso NEMA 11 Y su respectivo driver L9110S. Además este dispositivo hace uso de un rodamiento circular DIN 365 y dos rodamientos lineales FF2010 que aumentan la precisión, repetibilidad y fiabilidad del mismo. En caso que se desee implementar la presente mecanismo en un bajo electrónico se deberá redimensionar los elementos para una fuerza mucho más alta que la del presente dispositivo.

Se programó el algoritmo en el microprocesador conforme lo mostrado en el apartado 4.2.6. donde se muestra expresado tanto en un diagrama de flujo como en el código dentro del IDE de Arduino para ser subido a la tarjeta o microcontrolador.

Se empleó el software CAD Solidworks para el diseño de la tapa de la jaula del resorte y la bancada del dispositivo para posteriormente con el uso de tecnologías de manufactura sustractiva y aditiva llevarlos al mundo real para ser parte del prototipo.

Se midieron los tiempos que toma al dispositivo efectuar los cambios correctivos en dos escenarios: cambio de afinación y rotura de cuerda; donde se verificó que los rangos de porcentajes de reducción de tiempo, respecto al estándar de la industria (ajuste manual), son de 92-85% y de 94-88% respectivamente.

VIII. RECOMENDACIONES

Si bien es cierto que el dispositivo logró funcionar correctamente, este también ha ocupado un espacio más grande de lo que en un principio se estimó (ver anexo 10.1) dejando así una remota posibilidad de una salida al mercado. Por lo cual se recomienda que, en el caso de una posible comercialización, esta se haga en conjunto con un instrumento para así poder aprovechar mejor los espacios.

Es sabido que los esfuerzos de investigación, desarrollo e innovación en general están dedicados casi íntegramente a la diferenciación de entre los productos más que a la innovación de productos o procesos [40] por ello, añadiendo a la recomendación anterior, es deseable que la guitarra que albergue al dispositivo prototipado en este trabajo tenga priorizados criterios ergonómicos, de conectividad digital (específicamente con DAWs o estaciones de trabajo de audio digital por sus siglas en ingles) y eficiencia energética en el uso de materiales a diferencia de los criterios prioritarios prevalentes en la industria como son la forma del cuerpo del instrumento o el uso de colores en el pintado del mismo.

Para perfeccionar el diseño se recomienda corregir las posibles futuras fallas o malfuncionamientos que puedan ocurrir a partir de un uso intensivo del presente prototipo.

La electrónica del dispositivo, ya sea en los componentes del mismo como en la lógica programada en el microcontrolador, es un área donde hay espacio para la mejora por ello se recomienda probar con distintos tipos de sensores y microcontroladores con el objetivo de mejorar el funcionamiento, sensibilidad del dispositivo e interfaz del usuario.

Se recomienda probar distintos materiales para la bancada, de preferencia metales, con el objetivo de verificar si este cambio tiene alguna incidencia sobre las características tímbricas del instrumento.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

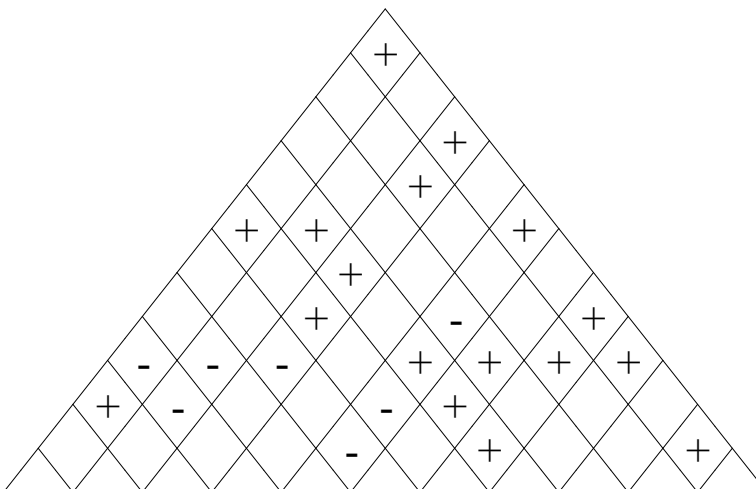
- [1] T. D. Rossing, *The Science of String Instruments*, New York: Springer, 2010.
- [2] J. A. Kemp, "The physics of unwound and wound strings on the electric guitar applied to the pitch intervals produced by tremolo/vibrato arm systems," *PLOS ONE*, p. 4, 21 September 2017.
- [3] P. A. Bigsby, "TAILPIECE VIBRATO FOR STRING INSTRUMENT". USA Patent 169120, 15 November 1952.
- [4] C. L. Fender, "TREMOLO DEVICE FOR STRINGED INSTRUMENTS". USA Patent 2741146, 30 August 1954.
- [5] F. D. Rose, "GUITAR TREMOLO METHOD AND APPARATUS". USA Patent 4171661, 3 January 1977.
- [6] F. D. Rose, "TREMOLO AND TUNING APPARATUS". USA Patent 4967631, 5 September 1989.
- [7] D. J. Borisoff, "TREMOLO BRIDGE APPARATUS". USA Patent 6015945, 23 December 1998.
- [8] I. V. Mateos, "MECANISMO DE TREMOLO PARA GUITARRAS ELECTRICA". España Patent ES 1119430 U, 25 Agosto 2014.
- [9] C. Lyles, "MODULAR BRIDGE FOR STRINGED MUSICAL INSTRUMENT". USA Patent 7855330 B2, 21 December 2010.
- [10] F. D. Rose, "TOP MOUNTED TREMOLO AND TUNING APPARATUS". USA Patent US 2014/0202307 A1, 27 February 2013.
- [11] G. L. McCabe, "Tremolo stop and stabilizer". USA Patent US10043494B1, 08 July 2018.
- [12] J. A. Kemp, "The physics of unwound and wound strings on the electric guitar applied to the pitch intervals produced by tremolo/vibrato arm systems," *PLOS ONE*, p. 2, 21 September 2017.
- [13] R. A. Serway and J. W. Jewett, "Sobreposición y ondas estacionarias," in *Física para ciencias e ingeniería Volumen 1*, Novena ed., México D. F., CENGAGE Learning, 2015, pp. 533-555.
- [14] R. A. Serway and J. W. Jewett, "Movimiento ondulatorio," in *Física para ciencias e ingeniería Volumen 1*, Novena ed., México D. F., CENGAGE Learning, 2015, pp. 483-499.
- [15] J. K. N. R. G. Budynas, "Deflexión de resortes helicoidales," in *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, México D. F., McGrawHill, 2008, p. 502.
- [16] J. K. N. R. G. Budynas, "Mecánica de los tornillos de potencia," in *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Mexico D.F., McGrawHill, 2008, pp. 400-407.
- [17] RoyMech, "Power Screws," [Online]. Available: http://www.roytech.co.uk/Useful_Tables/Cams_Springs/Power_Screws.html. [Accessed 06 2018].
- [18] R. J. Eggert, "Power Screws," in *Standard handbook of machine design*, New York, McGraw-Hill, 2004, pp. 13.1-13.13.
- [19] J. K. N. R. G. Budynas, "Elementos mecánicos flexibles," in *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, México D. F., McGrawHill, 2008, pp. 1059-1107.
- [20] E. Raffo Lecca, "Algoritmos: análisis & diseño," Lima, RAFFO-LECCA Editores, 1999, pp. 9-20.
- [21] O. E. B. Zapata and F. B. Zapata, "Microcontroladores," in *Microcontroladores PIC con programación PBP*, México D.F., Alfaomega, 2012, p. 19.
- [22] D. Ibrahim, "Programación de microcontroladores PIC," Barcelona, Marcombo, 2007, pp. 2-3.
- [23] M. Banzi and M. Shiloh, *Introducción a Arduino*, Madrid: Anaya Multimedia, 2016.
- [24] J. Angulo Usategui and I. Angulo Martinez, "Microcontroladores "PIC" Diseño práctico de aplicaciones," Madrid, McGrawHill, 2003, pp. 1-2.
- [25] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. T. Puente and R. Aracil, "Potenciómetros," in *Robots y Sistemas Sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, pp. 161-162.
- [26] W. Bolton, "Sensor de potenciómetro," in *MECATRÓNICA Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*, México D. F., Alfaomega Grupo Editor, 2010, p. 28.
- [27] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. T. Puente and R. Aracil, "Sensores capacitivos," in *Robots y Sistemas Sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, pp. 162-164.
- [28] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. Puente and R. Aracil, "Otros sensores inductivos," in *Robots y sistemas sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, p. 165.
- [29] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. Puente and R. Aracil, "Sensores basados en el efecto Hall," in *Robots y sistemas sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, p. 166.

- [30] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. Puente and R. Aracil, "Otros sensores opticos," in *Robots y sistemas sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, p. 169.
- [31] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. Puente and R. Aracil, "Sensores de ultrasonidos," in *Robots y sistemas sensoriales*, Balboa, Pearson Education, 2002, pp. 170-171.
- [32] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley and S. D. Umans, in *Máquinas Eléctricas*, México D. F., McGrawHill, 2005, p. 123456.
- [33] W. Bolton, "Motores paso a paso," in *MECATRÓNICA Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*, México D.F., Alfaomega, 2010, pp. 210-216.
- [34] D. G. Ullman, "Understanding the Problem and the Development of Engineering Specifications," in *The Mechanical Design Process*, New York, McGraw-Hill, 2003, pp. 143-170.
- [35] D'Addario, "String Tension 101," [Online]. Available: http://www.daddario.com/upload/tension_chart_13934.pdf.
- [36] FacFox, "MJF Nylon PA 12," [Online]. Available: <https://facfox.com/materials/mjf-nylon-pa-12/>.
- [37] ultimate-guitar.com.
- [38] E. Potozén, "Prueba de cambio de afinación," 23 Mayo 2021. [Online]. Available: <https://youtu.be/a6q-mqc7Rl4>.
- [39] E. Potozén, "Prueba de rotura de cuerda," 24 Mayo 2021. [Online]. Available: <https://youtu.be/EgU08-M60eY>.
- [40] I. De Loo and L. Soete, "The Impact of Technology on Economic Growth: Some New Ideas," Maastricht Economic Research Institute on Innovation and Technology, Maastricht, 1999.

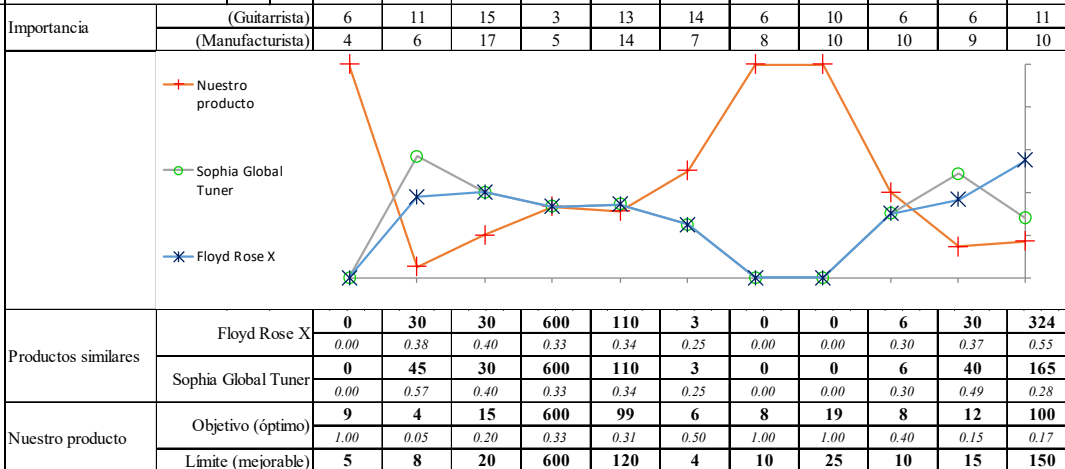
X. ANEXOS

10.1 Matriz de despliegue de la función de calidad

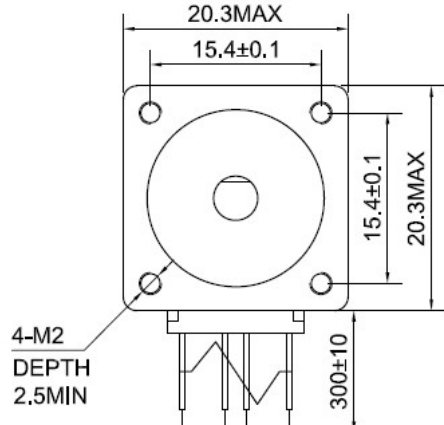
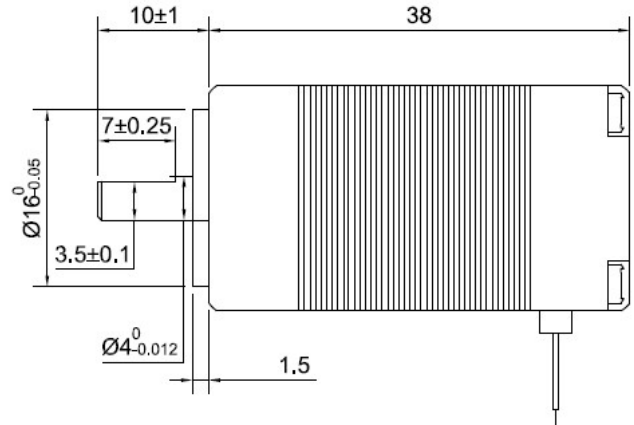
Legenda	
Correlaciones entre requerimientos	
Positivo	+
Negativo	-
Sin correlación	
Tipo de relación entre especificaciones y	
Fuerte	● = 9
Media	○ = 3
Débil	△ = 1
Ninguna	= 0



¿Qué?		¿Quiénes?		¿Cómo?										Ahora					
		Guaitarrista	Manufacturista	Performance funcional	Factores humanos	Requerimientos físicos		Confiabilidad	Ensamblaje y manufactura		Ciclo de vida		Recursos	1 = muy mal 5 = muy bien					
				Alimentación a 9Vdc	Tiempo en el que se realiza el ajuste estabilizador	Rápida y fácil instalación e implementación	Carga de 450 N axial	Mecanismo y unidad motora restringido a 20x55x90mm	Tiempo alto entre fallas	Partes obtenibles fácilmente en el mercado	Uso de manufactura aditiva según sea conveniente	Tiempo entre mantenimientos/limpzas	Rápido y fácil reemplazo de piezas	Costo accesible	Floyd Rose X - ◊ Sophia Global Tuner - □				
		V		↓ seg	↓ min		N	mm^3	↑ meses	↑ #	↓ cm^3	↑ meses	↓ min	↓ \$	1	2	3	4	5
Mantener el puente en una posición fija	Mecanismo simple	6	16			●	●	●	●	●	●	●	●	●				□	◊
	Sensor pequeño y simple	7	11	△		○		○		●		○		○	◊	□			
Implementación e instalación	Control electrónico preciso y fiable	20	6		△				●						◊	□			
	Integración con instrumentos existentes	17	13	●	○	●		●	△		●			●				◊	□
	Evitar nuevas cavidades en la madera	15	16		○	○		○			○			○					□
Interfaz hombre-máquina	Unidad digital y de almacenamiento de energía	7	12	○		●	○	△			○	△		△	◊	□			
	Fácil acceso	10	20		○	●		●		△	○	●	●						◊
	Interfaz simple e intuitiva	18	6		●	△			●	△	△		△	○				◊	□



10.2 Hoja de especificaciones del motor NEMA 8

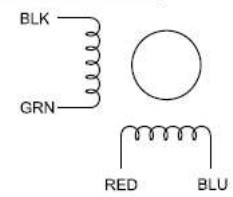




SPEZIFIKATION	VERBINDUNG	BIPOLAR
AMPS/PHASE		0.60
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		10.00±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		5.50±20%
HOLDING TORQUE(Nm)[lb-in]		0.04[0.35]
STEP ANGLE(°)		1.80
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5.00%
ROTOR INERTIA(g-cm²)		4.00
WEIGHT(Kg)[lb]		0.08[0.18]
TEMPERATURE RISE:MAX,80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C[14°F-122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		
AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)		

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	A
2	A\ —	GRN	A\
3	B —	RED	B
4	B\ —	BLU	B\

FULL STEP 2 PHASE-Ex. , WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A\	B\	
1	+	+	-	-	↓ CCW ↑ CW
2	-	-	+	+	
3	+	+	-	-	
4	-	-	+	+	

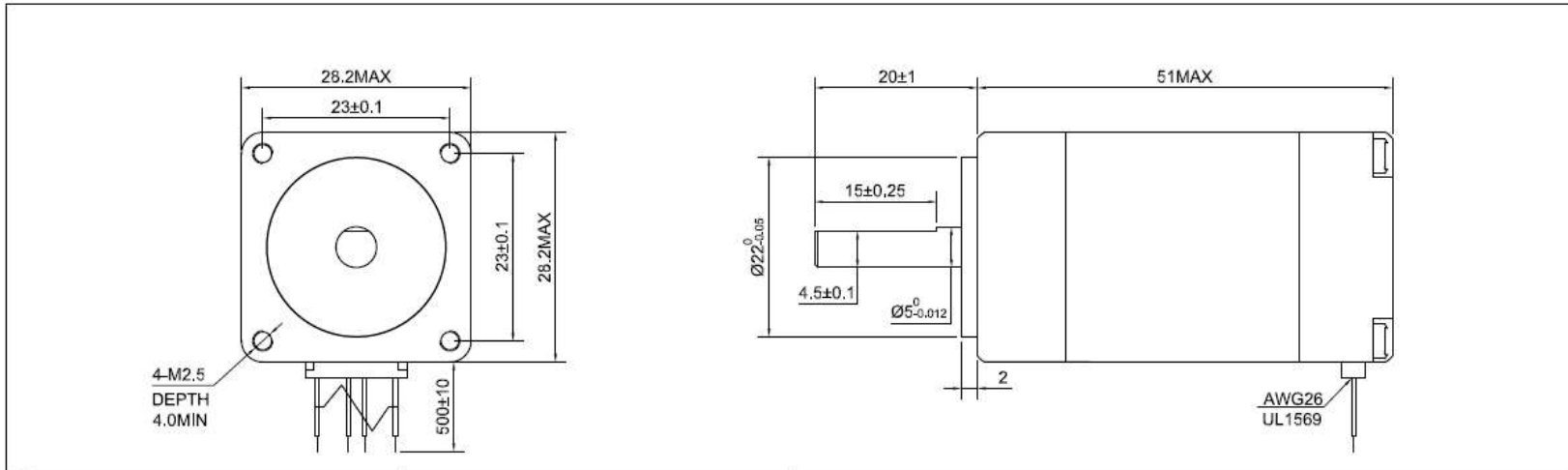




APVD		8.17.2018
CHKD		
DRN		
SCALE	SIGNATURE	DATE

STEPPER MOTOR

8HS15-0604S



SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR	
AMPS/PHASE		0,67	
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		9,20±10%	
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		5,70±20%	
HOLDING TORQUE(Nm)(lb-in)		0,12[1,04]	
STEP ANGLE(°)		1,80	
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5,00%	
ROTOR INERTIA(g-cm²)		18,00	
WEIGHT(Kg)(lb)		0,20[0,44]	
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)			
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C[14°F-122°F]			
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)			
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]			
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)			
AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)			
		APVD	8,17,2018
		CHKD	
		1.5:1	DRN
		SCALE	SIGNATURE

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	A
2	A\ —	GRN	A\
3	B —	RED	B
4	B\ —	BLU	B\



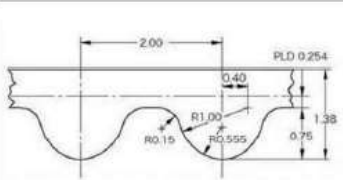
FULL STEP 2 PHASE-Ex. ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A\	B\	
1	+	+	-	-	CCW
2	-	+	+	-	↓
3	-	-	+	+	CW
4	+	-	-	+	↑

STEPPER MOTOR

11HS20-0674S

10.4 Hoja de especificaciones de la banda sincrónica GT-2



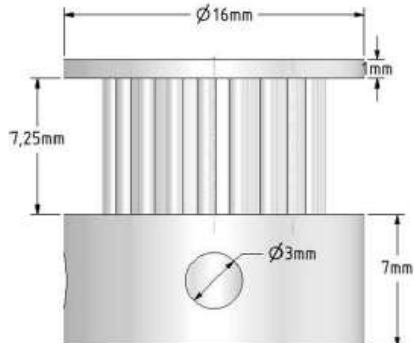
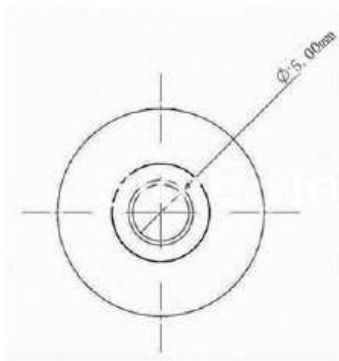

													
Datasheet													
<h3 style="text-decoration: underline;">GT2 Timing Belt - Open Ended</h3>													
<p>The GT2 series of belts are designed specifically for linear motion. They use a rounded tooth profile, with 2mm pitch, that guarantees that the belt tooth fits smoothly and accurately in the pulley groove, so when you reverse the pulley direction, there is no room for the belt to move in the groove. Belts are supplied as one length which is easily cut to the required length. Work with GT2 pulley for most variants of 3D printer, CNC machine, robotics and other linear motion designs. Reinforcing Cords are Fiberglass (belting can be easily cut with regular scissors)</p>													
													
<p>SKU: MCH-1123</p> <p>Brief Data:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Belt Pitch: 2mm. • Belt Width: 6mm. • Length: 1 meter. • Shape: Open-Ended Timing Belt. • Belt Height: 1.38mm. • Tooth Height: 0.75mm. • Breaking Strength: 124 lb / 56kg • Working Tension: 6.25 lb / 2.8kg. 													
1	www.handsontec.com												
Mechanical Dimension:													
Unit: mm													
								GT 2 Timing Belt - 2 mm Pitch 6 mm Wide					
								Material: Rubber		Reinforcement: Fibre Glass		Colour: Black	
REFERENCE	Mat/Finish	Type	Pitch	R ₁	R ₂	R ₃	b	H	h	i	PLD		
HT-GT2-06	R/FG/B	GT2	2	0.15	1	0.555	0.4	1.39	0.75	0.63	0.254		
2	www.handsontec.com												

Application Examples:

GT2 timing belt used with GT2 Pulley and Idle Pulley in CNC Router, 3-D Printer and linear motion for robotics design.



10.5 Hoja de especificaciones de la polea sincrónica GT-2

<div data-bbox="283 365 1060 446">  Handson Technology </div> <div data-bbox="268 462 378 487"> <p>Datasheet</p> </div> <div data-bbox="367 503 976 544"> <h3>GT2 Aluminium Pulley 20-Teeth</h3> </div> <div data-bbox="268 560 1071 698"> <p>The GT2 series of belts and pulleys are designed specifically for linear motion. They use a rounded tooth profile that guarantees that the belt tooth fits smoothly and accurately in the pulley groove, so when you reverse the pulley direction, there is no room for the belt to move in the groove. This pulley has 20 teeth, and a 5mm inner bore. Two set screws can be used to attach it firmly to any 5mm diameter shaft such as one of our stepper motors. Full aluminum construction means these are very light and very durable.</p> </div> <div data-bbox="546 714 787 1023">  </div> <div data-bbox="268 1096 378 1128"> <p>Brief Data:</p> </div> <div data-bbox="325 1144 630 1307"> <ul style="list-style-type: none"> • Number of Teeth: 20. • Bore: Ø5mm. • Flange: Dual. • Pitch: 2mm. • Belt Width: 6mm. • Material: Full Aluminum Alloy. </div> <div data-bbox="325 1315 346 1347"> <p>1</p> </div> <div data-bbox="840 1315 1071 1347"> <p>www.handsontec.com</p> </div>	<div data-bbox="1102 365 1323 389"> <p><u>Mechanical Dimension:</u></p> </div> <div data-bbox="1291 430 1701 771">  </div> <div data-bbox="1176 803 1512 1161">  </div> <div data-bbox="1564 836 1806 1136">  <p>Two M3 x 4 set screws</p> </div> <div data-bbox="1144 1315 1165 1347"> <p>2</p> </div> <div data-bbox="1659 1315 1900 1347"> <p>www.handsontec.com</p> </div>
---	---

10.7 Hoja de especificaciones del rodamiento radial DIN 635

SCHAEFFLER

SCHAEFFLER

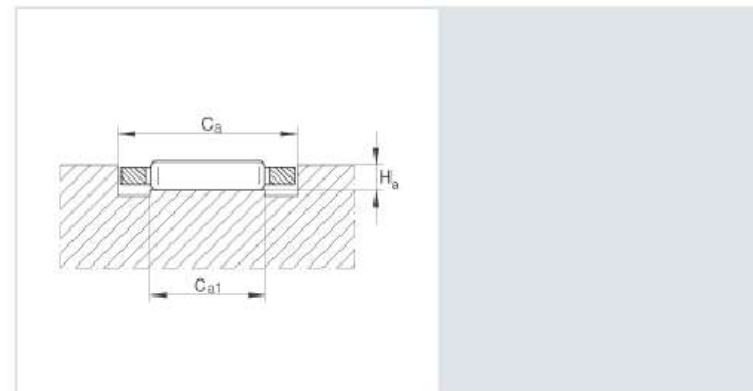
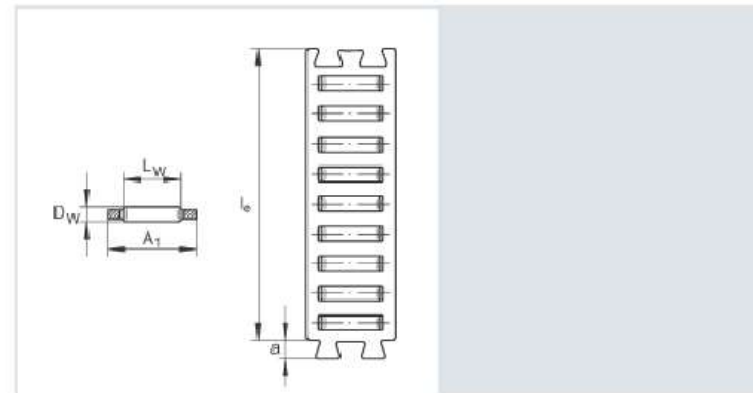
FF2010 (Series FF)

needle roller flat cages

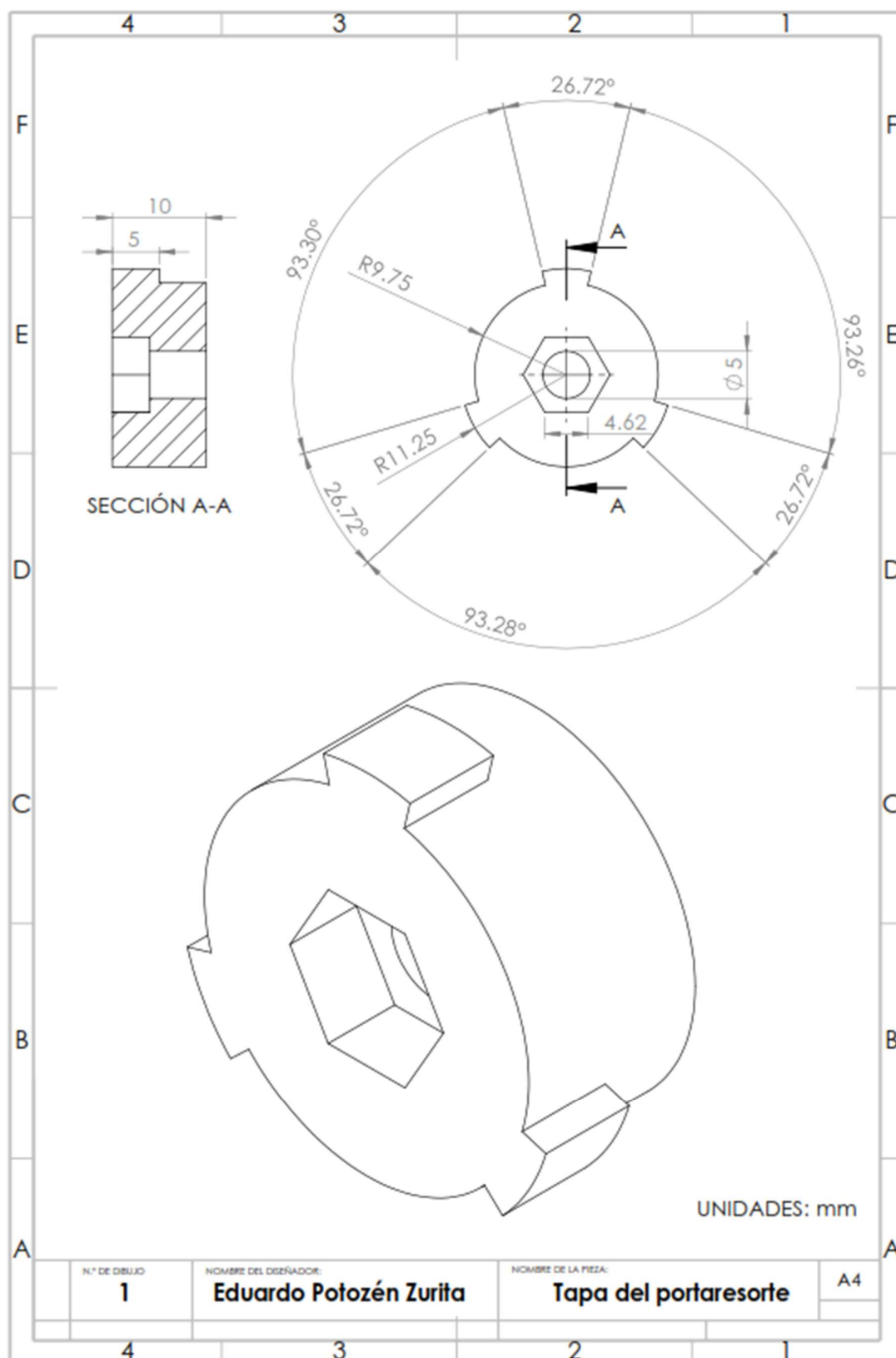
The datasheet is only an overview of dimensions and basic load ratings of the selected product. Please always observe all the guidelines in these overview pages. Further information is given on many products under the menu item "Description". You can also order comprehensive information via the Catalogue ordering system (https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/news_media/index.jsp) or by telephone on +49 (91 32) 82 - 28 97.

D_w	2 mm	
A_t	10 mm	
l_e	32 mm	
a	2 mm	
C_a	10,3 mm	Tolerance: +0,2/0
C_{a1}	7 mm	
H_a	1,7 mm	
L_w	6,8 mm	
Z_e	7 mm	Number of rolling elements in a cage element
m_k	0,046 kg/m	Mass
C	21300 N	Basic load rating

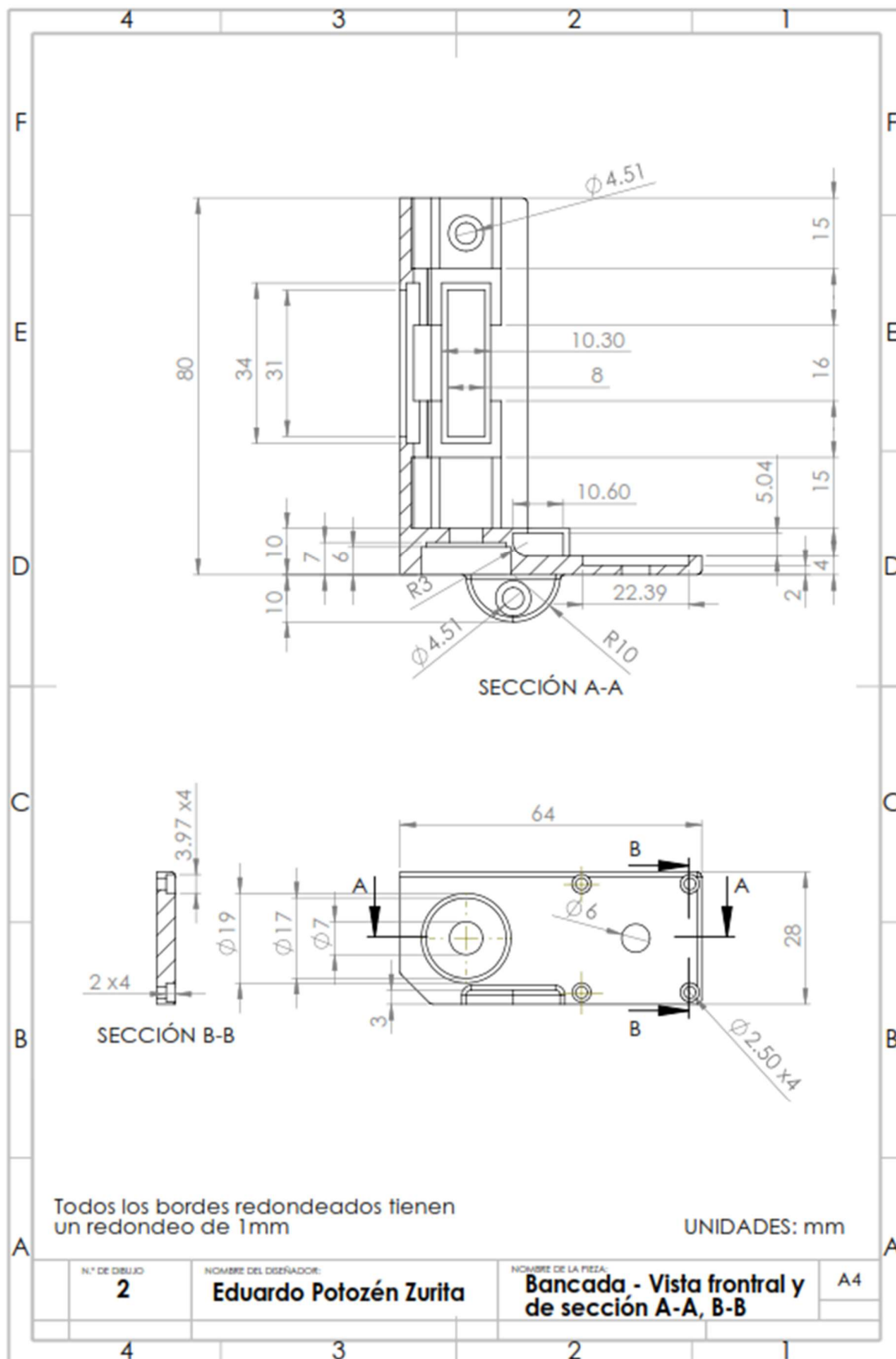
C_0	61900 N	Basic load rating
-------	---------	-------------------



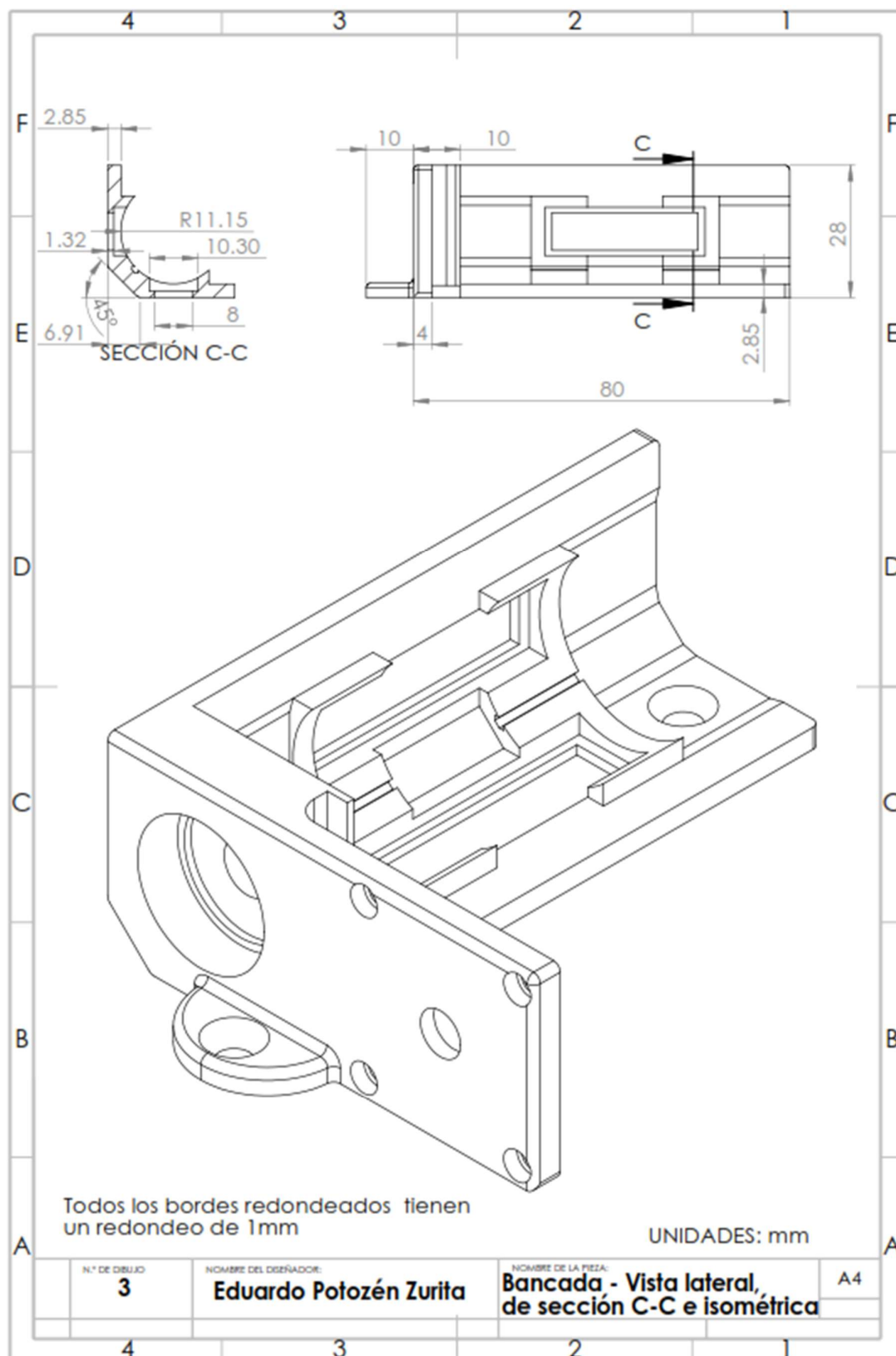
10.8 Plano de la tapa del portaresorte



10.9 Plano 1 de la bancada



10.10 Plano 2 de la bancada



10.11 Tabla de frecuencia de las notas de las octavas 1 al 4

Nota	Frecuencia (Hz)			
	Octava 1	Octava 2	Octava 3	Octava 4
C	32.7	65.41	130.81	261.63
C#	34.65	69.3	138.59	277.18
D	36.71	73.42	146.83	293.66
D#	38.89	77.78	155.56	311.13
E	41.2	82.41	164.81	329.63
F	43.65	87.31	174.61	349.23
F#	46.25	92.5	185	369.99
G	49	98	196	392
G#	51.91	103.83	207.65	415.3
A	55	110	220	440
A#	58.27	116.54	233.08	466
B	61.74	123.47	246.94	493.88

10.12 Tabla de densidad másica lineal de las cuerdas de guitarra D'Addario

NO ENTORCHADAS			ENTORCHADAS		
Calibre (in)	μ (lb/in)	μ (kg/m)	Calibre (in)	μ (lb/in)	μ (kg/m)
0.007	0.00001085	0.000193759	0.017	0.00005524	0.000986474
0.008	0.00001418	0.000253226	0.018	0.00006215	0.001109873
0.0085	0.00001601	0.000285906	0.019	0.00006947	0.001240593
0.009	0.00001794	0.000320372	0.020	0.00007495	0.001338454
0.0095	0.00001999	0.000356981	0.021	0.00008293	0.001480961
0.010	0.00002215	0.000395554	0.022	0.00009184	0.001640075
0.0105	0.00002442	0.000436092	0.024	0.00010857	0.001938839
0.011	0.00002680	0.000478593	0.026	0.00012671	0.002262783
0.0115	0.00002930	0.000523238	0.028	0.00014666	0.002619049
0.012	0.00003190	0.000569669	0.030	0.00017236	0.003077999
0.013	0.00003744	0.000668602	0.032	0.00019347	0.00345498
0.0135	0.00004037	0.000720926	0.034	0.00021590	0.003855535
0.014	0.00004342	0.000775393	0.036	0.00023964	0.004279483
0.015	0.00004984	0.000890041	0.038	0.00026471	0.004727182
0.016	0.00005671	0.001012725	0.039	0.00027932	0.004988087
0.017	0.00006402	0.001143267	0.042	0.00032279	0.005764372
0.018	0.00007177	0.001281666	0.044	0.00035182	0.006282789
0.019	0.00007997	0.001428101	0.046	0.00038216	0.0068246
0.020	0.00008861	0.001582394	0.048	0.00041382	0.007389983
0.022	0.00010722	0.001914731	0.049	0.00043014	0.007681425
0.024	0.00012760	0.002278676	0.052	0.00048109	0.008591288
0.026	0.00014975	0.00267423	0.054	0.00053838	0.009614371
			0.056	0.00057598	0.010285831
			0.059	0.00064191	0.011463206
			0.060	0.00066542	0.011883047
			0.062	0.00070697	0.012625045
			0.064	0.00074984	0.013390616
			0.066	0.00079889	0.01426655
			0.068	0.00084614	0.015110338
			0.070	0.00089304	0.015947877
			0.072	0.00094124	0.016808631
			0.074	0.00098869	0.017655991
			0.080	0.00115011	0.020538624