



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de una guitarra eléctrica sostenible

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero mecánico

P R E S E N T A

Helgi Saúl Waage Delgadillo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Arturo Barba Pingarrón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos

A toda mi familia, por su constante apoyo para mi desarrollo personal y profesional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA).

A mis profesores, el Dr. Arturo Barba Pingarrón, el Dr. Rafael González Parra y el Dr. Jesús Manuel Dorador González.

A todas las personas que conocí a lo largo de este trabajo; a los músicos, lauderos y técnicos de mantenimiento de guitarras que me apoyaron durante el desarrollo de este proyecto.

A los revisores de este documento, mis amigos Juan y Ximena.

Agradezco el apoyo de DGAPA UNAM a través del proyecto IT101221 “Desarrollo de Tecnologías Alternativas de Modificación de Superficies para la Mejora de Materiales de Potencial Industrial”

A mi madre

Contenido

Glosario	1
1. Introducción	2
1.1 Breve historia de la guitarra eléctrica	4
1.2 Estado actual del mercado de guitarras eléctricas.....	6
2. Metodología de diseño	9
3. Identificación de la necesidad	10
4. Objetivo de la tesis	11
5. Análisis funcional de sistemas existentes	11
5.1 Sistema de afinación: el clavijero	12
5.2 Sistema de mástil	14
5.2.1 Tipos de mástiles según su construcción	15
5.2.2 Perfiles de mástil	17
5.2.3 Radio del diapasón	18
5.2.4 Método de unión mástil - cuerpo.....	18
5.3 Sistema de cuerpo.....	20
5.4 Sistema de entonación.....	21
5.4.1 Trastes	21
5.4.2 Escala.....	23
5.4.3 Puente	24
5.5 Sistema eléctrico-electrónico.....	29
5.5.1 Pastillas.....	29
5.5.2 Posición de las pastillas	31
5.5.3 Selector.....	32
5.5.4 Potenciómetros	32
6. Revisión de nuevas tecnologías.....	33
6.1 Manufactura aditiva.....	33
6.2 Inducción de vibraciones.....	33
6.3 Puente Evertune.....	34
6.4 Sistemas de fijación de puente flotante.....	34
6.5 Afinadores robóticos	35
6.6 Emulación digital	35
6.7 Pastillas ópticas	36

6.8	Materiales compuestos.....	36
7.	Planteamiento de requerimientos preliminares.....	37
8.	Conociendo a los guitarristas.....	37
9.	Selección de un mercado objetivo.....	40
10.	Lista de requerimientos.....	40
11.	Designación de especificaciones.....	43
12.	Matriz QFD.....	43
13.	Estructura funcional de la guitarra eléctrica.....	46
13.1	Principios de solución.....	46
13.1.1	Sujeción de extremos de las cuerdas.....	46
13.1.2	Aplicación de tensión a las cuerdas y su regulación.....	47
13.1.3	Discretización mecánica de la longitud de cuerda vibrante.....	47
13.1.4	Transducción de movimiento en señales eléctricas.....	47
14.	Combinación de principios de solución.....	47
14.1	Evaluación de principios conforme a criterios técnicos y económicos.....	48
14.1.1	Sujeción de extremos de las cuerdas.....	48
14.1.2	Aplicación y regulación de tensión aplicada a las cuerdas.....	48
14.1.3	Discretización mecánica de la longitud de cuerda vibrante.....	48
14.1.4	Transducción de movimiento en señales eléctricas.....	48
15.	Concepto de diseño.....	48
16.	Diseño de configuración.....	49
17.	Diseño a nivel sistema.....	50
17.1	Selección de elementos del sistema de afinación.....	50
17.2	Selección de elementos del sistema de mástil.....	51
17.3	Selección de elementos del sistema de entonación.....	51
17.4	Selección de elementos del sistema de cuerpo.....	52
17.5	Selección de elementos del sistema eléctrico - electrónico.....	53
17.6	Verificación de compatibilidad.....	53
18.	Geometría preliminar.....	54
19.	Selección de materiales.....	55
20.	Simulación de esfuerzos.....	55
21.	Primer diseño propuesto.....	56
22.	Evaluación del primer diseño.....	57

23.	Etapa de rediseño.....	57
24.	Lista de requerimientos de rediseño	57
25.	Especificaciones de rediseño.....	59
26.	Matriz QFD del rediseño	59
27.	Estructura funcional del cuerpo de la guitarra.....	61
28.	Concepto y configuración.....	62
29.	Rediseño de sistemas	63
29.1	Sistema de cuerpo.....	63
29.2	Sistema eléctrico-electrónico.....	64
30.	Selección de materiales y realización de simulaciones.....	65
31.	Segundo diseño propuesto	67
32.	Evaluación del segundo diseño	67
33.	Conclusiones.....	68
34.	Anexo I: Encuesta	69
34.1	Sección 1: Preguntas de contexto	69
34.2	Sección 2: Preguntas sobre materiales	71
35.	Anexo II: Entrevista	72
36.	Anexo III: Información recabada de las entrevistas.....	73
37.	Anexo IV: Índice de figuras.....	85
	Trabajos citados	89

Glosario

Concepto	Definición
<i>Bolt-on</i>	Método de unión entre el mástil y el cuerpo mediante tornillos.
Clavijero tradicional y <i>headless</i>	Conjunto de partes que ajustan y conservan la tensión aplicada a las cuerdas de la guitarra, tradicionalmente situado en el extremo del mástil. Si se sitúa en el cuerpo del instrumento, se dice que es una guitarra <i>headless</i> .
<i>Coil Split</i>	Método para utilizar solo una de las bobinas de una pastilla <i>humbucker</i> .
<i>Coil Tap</i>	Método para utilizar una cantidad menor de vueltas de bobinado en una pastilla electromagnética.
<i>Humbucker</i>	Pastilla electromagnética de doble bobina.
<i>Neck dive</i>	Tendencia de la guitarra a inclinarse debido al momento generado por el peso del mástil (es preferible evitarlo).
<i>Neck through</i>	Configuración en la que el mástil y el cuerpo no necesitan unirse pues están fabricados a partir de la misma pieza de madera.
Pastilla	También llamada <i>pickup</i> o <i>cápsula</i> , es un elemento que transduce la vibración de las cuerdas en una señal eléctrica.
Retroalimentación acústica	Fenómeno en el que las ondas sonoras que interactúan en una caja de resonancia se mezclan con las generadas por el propio altavoz (es preferible evitarlo).
<i>Set neck</i>	Método de unión entre el mástil y el cuerpo mediante materiales adhesivos.
<i>Single Coil</i>	Pastilla electromagnética de bobina simple.
<i>Sustain</i>	Capacidad del instrumento de mantener sonidos por un tiempo prolongado.

1. Introducción

Desde hace miles de años, la música ha sido un pilar en la cultura de todas las civilizaciones humanas. Es común atribuir a esto la antiquísima imitación de sonidos de la naturaleza con los que la humanidad ha interactuado. Se han descubierto piezas arqueológicas que datan de hace 37 mil años y prueban la existencia de herramientas destinadas a esta emulación de sonidos (Conard & Malina, 2008). Si bien dichos artefactos están fabricados con huesos y funcionan mediante el aire que circula por sus cavidades, a lo largo de la historia el hombre ha experimentado con diferentes geometrías, materiales y principios de funcionamiento, de manera que los utensilios han evolucionado hasta constituir la vasta variedad de instrumentos musicales que existe actualmente. De este modo, es innegable que la música sigue siendo el medio de expresión en el que las personas utilizan sonidos y ritmos procedentes de su entorno para replicarlos y crear nuevos sonidos usando las herramientas que tienen a su disposición.

Los instrumentos musicales funcionan a través de vibraciones y se clasifican en tres grandes grupos: aerófonos, autófonos y cordófonos, según el elemento que produzca dichas vibraciones, siendo respectivamente, el viento, el propio cuerpo del instrumento o cuerdas sujetas a éste (Pérez de Arce, 2013). Para producir sonido, las cuerdas pueden ser frotadas -como en el violín- o pulsadas, como es el caso de la guitarra.

Las cuerdas pulsadas han sido una herramienta para hacer música desde hace más de 5000 años; como puede observarse en la Figura 1, existen pinturas egipcias que datan del 3000 a. C. en las que se hallan representadas arpas (International Harp Museum, 2009). Un arpa cuenta con múltiples cuerdas a tensión que generan sonidos cuando son pulsadas por el ejecutante. Cabe resaltar que cada cuerda produce un solo sonido, por lo que para generar sonidos diferentes se deben utilizar varias cuerdas. La lira funciona de esta misma manera.



Figura 1 Pintura egipcia en la que aparece un arpa

Sin embargo, con una sola cuerda se pueden generar muchos sonidos al modificar la longitud a la que se le permite vibrar, y pueden crearse instrumentos con múltiples cuerdas en los que se pueda modificar independientemente la longitud vibrante de cada una. Este fue el fundamento para el desarrollo del laúd, cuyo espécimen físico más antiguo proviene del año 1490 a. C. Har-Mosë fue el músico predilecto de Sen-mut –un importante arquitecto egipcio- y fue enterrado cerca de su amo, junto con su laúd. Gracias a la preservación lograda dentro de la tumba, el laúd de Har-Mosë se ha conservado a lo largo de los siglos y es aún más antiguo que las pinturas de laúdes que se conocen hasta la fecha. Como se observa en la Figura 2, este instrumento cuenta con una caja de resonancia ovalada, un mástil de sección transversal circular, dos puentes para tensar las cuerdas y amarres para

cada una de éstas (3 en total) situados en el extremo derecho del mástil (Scott, 1944). Para pulsar la cuerda se utilizaba un elemento llamado plectro -actualmente llamado púa o plumilla- que se encuentra atado al cuerpo del instrumento.

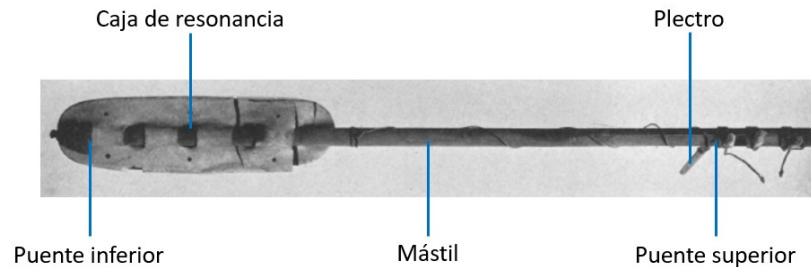


Figura 2 El laúd de Har-Mosë

A pesar de que la estructura del laúd de Har-Mosë guarda muchas similitudes con la de una guitarra, existe una discusión sobre si la guitarra es una evolución directa de ese tipo de laúd o si fue enteramente desarrollada en Europa, pues los instrumentos de cuerda pulsada tuvieron un auge durante la Edad Media y el Renacimiento. Algunos de estos instrumentos fueron el cítolo, el cistro, la vihuela, la guiterna y nuevas versiones del laúd. Como se observa en la Figura 3, estos instrumentos comparten su estructura básica, pero difieren en la geometría del cuerpo o el número de cuerdas.

Uno de los motivos de la discusión mencionada en el párrafo anterior es que los instrumentos medievales que se consideran antepasados de la guitarra cuentan con trastes; los trastes son barras metálicas que, como se explicará más adelante, facilitan el posicionamiento de los dedos del intérprete. Los trastes fueron incorporados al laúd europeo en el siglo XV; sin embargo, llevaban utilizándose en instrumentos orientales desde mucho antes (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2019). Se tiene evidencia de que en el siglo X se creó en India la primera vina de Saraswati, que ya incluía trastes y es el antecedente directo de la cítara moderna (Slawek, 1987).



Figura 3 Instrumentos medievales.
De izquierda a derecha: cítolo, cistro, vihuela y laúd

A pesar de que aún se dieron varios cambios en la geometría de los instrumentos de cuerda pulsada hasta llegar a la de la guitarra acústica actual, su estructura funcional básica siguió siendo la misma: múltiples cuerdas se sujetan a dos extremos del instrumento y son tensadas mediante dos elementos: la cejuela y el puente. Comúnmente, las cuerdas se

sujetan al puente o a un elemento cercano, mientras que hay elementos mecánicos para ajustar la tensión de la cuerda en el extremo correspondiente a la cejuela. Además, como se dijo, la incorporación de trastes facilitó el posicionamiento de los dedos del ejecutante.



Figura 4 Guitarra con resonador

1.1 Breve historia de la guitarra eléctrica

En los albores del siglo XX era relativamente común el uso de instrumentos musicales para complementar al cine mudo; las guitarras no tenían lugar en este contexto pues su sonido no contaba con el volumen para ser escuchado en todo el cine, además de ser opacado por los demás instrumentos. En 1925, el laudero John Dopyera diseñó y fabricó el Dobro, o guitarra con resonador (Fig. 4), que utilizaba conos de aluminio debajo del puente para amplificar el sonido, logrando que fuera 3 o 4 veces más potente que una guitarra acústica convencional (Reynolds, 2001).



Figura 5 Rickenbacker Electro Frying Pan

Un par de años después, George Beauchamp inventó la pastilla electromagnética, capaz de transducir las vibraciones de cuerdas metálicas en señales eléctricas. Este elemento fue incorporado por la empresa Rickenbacker Electro en su guitarra Frying Pan (Fig. 5), cuyo cuerpo hueco estaba fabricado completamente de aluminio. Este instrumento contaba con problemas de interferencia que fueron tomados en cuenta por Rickenbacker al diseñar el modelo Electro Spanish Model B (Fig. 6), que también utilizaba una pastilla electromagnética, pero su cuerpo se fabricaba con baquelita y tapas de acero inoxidable, esta guitarra se puso a la venta en 1935 (Henzig, 2017).



Figura 6 Rickenbacker Electro Spanish Model B



Figura 7 Gibson ES-150

Simultáneamente, Orville Gibson buscaba la manera de amplificar el sonido de las guitarras acústicas que fabricaba, y en 1936 puso a la venta la Gibson ES-150 (Fig. 7), cuyo cuerpo de madera era completamente hueco y contaba con pastillas electromagnéticas. Gracias a que utilizaba materiales similares a las guitarras acústicas y a la popularidad de los músicos que la utilizaban, Gibson se posicionó como la empresa más importante en el diseño y manufactura de guitarras eléctricas.

El uso de cuerpos huecos no había presentado inconvenientes hasta que se incorporaron los sistemas de amplificación, pues la exposición de un cuerpo hueco a sonidos y volúmenes muy altos provoca problemas de retroalimentación acústica. No fue sino hasta 1949 que Leo Fender diseñó la guitarra Fender Esquire –posteriormente llamada Telecaster– (Fig. 8), cuyo cuerpo sólo contaba con las cavidades estrictamente necesarias para colocar los componentes eléctrico-electrónicos. A este tipo de cuerpo se le denomina sólido.



Figura 8 Fender Esquire

En 1952, Gibson puso a la venta un modelo de guitarra de cuerpo sólido (Fig. 9, izquierda), al que llamó Les Paul como el guitarrista homónimo. Un par de años después Fender rediseñó su Telecaster, generando la Stratocaster (Fig. 9, derecha). Desde entonces, los modelos Les Paul y Stratocaster han gozado de gran popularidad entre los usuarios (Paté, y otros, 2012).



Figura 9 Gibson Les Paul Goldtop 1952 (izquierda) y Fender Stratocaster 1954 (derecha)

Con el paso de los años, se han desarrollado muchos otros modelos de guitarra eléctrica, que ofrecen experiencias muy diferentes a los usuarios, ya sea por ergonomía, sonido o meramente por su estética visual.

1.2 Estado actual del mercado de guitarras eléctricas

En general, el desarrollo de productos presenta discontinuidades que se dan cuando una nueva tecnología aparece. Cada una de estas nuevas tecnologías comienza un ciclo tecnológico, que puede terminar sin afectar al mercado o tener una influencia mayúscula en éste. Cuando esto sucede, se dice que se llegó a un diseño dominante. La arquitectura de un diseño dominante impera sobre una clase específica de productos (Anderson & Tushman, 1990).

Han pasado setenta años desde que se comercializaron las guitarras Fender Stratocaster y Gibson Les Paul, cuya popularidad las convirtió en diseños dominantes. Esto generó dos nuevos sub-mercados y otras empresas siguieron los pasos de las líderes, fabricando guitarras similares a las mencionadas (Fig. 10). La presencia de instrumentos con geometría y características semejantes en el mercado llevó a los clientes a comparar el rendimiento técnico de los instrumentos, así como sus precios.



Figura 10 Fender Stratocaster y Gibson Les Paul como diseños dominantes

Con el tiempo, se han generado nuevos diseños dominantes, pero no han reemplazado a los mencionados en párrafos anteriores, sino que han creado nuevos sub-mercados. Si bien algunos de estos diseños han sido desarrollados por las propias Fender y Gibson, empresas como Strandberg también han logrado generar nuevos sub-mercados. En la Figura 11 se presentan varios diseños dominantes y algunos que les son similares.



Figura 11 Otros diseños dominantes y diseños similares

Al diseñar una guitarra eléctrica debe tenerse en cuenta la competencia existente en los distintos sub-mercados, o en todo caso, su capacidad de generar uno nuevo –esto es, convertirse en un diseño dominante-. Cabe mencionar que existen modelos de guitarra que son exitosos comercialmente pero no se consideran diseños dominantes pues no han sentado estándares para el diseño subsecuente de otras guitarras.

Debido a que no todas las personas tienen las mismas preferencias, es muy difícil que un diseño satisfaga por completo las necesidades de todos los usuarios. Por esta razón, muchas empresas suelen utilizar una estrategia de *target marketing*, también llamada segmentación de mercado. Esta estrategia consiste en dividir el mercado en segmentos y desarrollar productos tomando en cuenta los gustos y necesidades de los clientes del o los segmentos objetivo (Camilleri, 2018).

Si bien existen múltiples mercados de guitarras eléctricas con geometrías similares, no todas las guitarras que compiten en un mismo mercado están dirigidas al mismo segmento de éste, pues los componentes, los materiales, e incluso los acabados y colores del instrumento pueden ser determinantes para que los clientes lo acepten o rechacen.

Además de la geometría, los materiales juegan un papel importante en las divisiones del mercado de guitarras. Tradicionalmente, la manufactura de guitarras se ha basado en el uso

de diversas maderas y la mayoría de los usuarios buscan instrumentos fabricados con este tipo de material. Desde mediados del siglo XX, las maderas más utilizadas en la manufactura de cuerpos de guitarra son las extraídas de los árboles de aliso y caoba, que fueron utilizadas por Fender y Gibson, respectivamente. Gracias a la influencia que tuvieron en el mercado las marcas referidas, muchas otras empresas han adoptado las mismas maderas para fabricar sus instrumentos (Neyses & Sandberg, 2015). Desafortunadamente, algunas de las especies de árboles de las que se obtiene la madera usada en guitarras se encuentran amenazadas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Maderas comúnmente utilizadas en la manufactura de guitarras eléctricas

Nombre común de la madera	Especies típicas	Popularidad (media \pm desviación estándar)
Madera de cuerpo		
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> <i>Khaya ivorensis</i>	42 \pm 7
Aliso	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Alnus Rubra</i>	22 \pm 8
Tilo	<i>Tilia americana</i> , <i>Tilia europaca</i>	14 \pm 5
Maple	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Acer macrophyllum</i> , <i>Acer platanoides</i>	6 \pm 7
Arce	<i>Fraxinus americana</i> , <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	6 \pm 3
Álamo	<i>Liriodendron tulipifera</i> , <i>Populus alba</i>	5 \pm 3
Madera de mástil		
Maple	<i>Acer saccharum</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Acer macrophyllum</i>	67 \pm 8
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Khaya ivorensis</i>	30 \pm 7
Madera de diapasón		
Palo rosa	<i>Dalbergia latifolia</i> , <i>Dalbergia baronii</i>	66 \pm 8
Maple	<i>Hacer saccharum</i>	19 \pm 4
Ébano	<i>Diospyros crassiflora</i> , <i>Diospyros celebica</i>	11 \pm 4

Se presentan las maderas más utilizadas en la fabricación de guitarras eléctricas, las especies de árboles de las que provienen y qué tan populares son. Las especies señaladas en rojo se encuentran amenazadas actualmente. Datos obtenidos de (Ahvenainen, 2018).

Afortunadamente, así como hay segmentos del mercado interesados en instrumentos fabricados con maderas específicas, otros segmentos muestran interés por experimentar con diferentes materiales. De esta forma, varias empresas están desarrollando guitarras con materiales experimentales. Por un lado, Aristides desarrolló un material compuesto denominado Arium para fabricar sus instrumentos, que prescinden por completo de la

madera. Por otro lado, Relish Guitars y EBG Instruments (Fig. 12, izquierda y derecha, respectivamente) hacen guitarras con cuerpos de aluminio y madera.



Figura 12 Relish Jane (izquierda) y EBG-6 Jigsaw (derecha)

2. Metodología de diseño

Después de realizar un análisis comparativo de las metodologías de diseño de French, Pahl & Beitz, Ulrich & Eppinger y el estándar VDI 2221, se propuso la metodología de diseño mostrada en la Figura 13. Es importante mencionar que se trata de un proceso cíclico, de manera que al llevar a cabo el diseño se regresó a etapas previas en varias ocasiones para afinar detalles y utilizar la información recabada.

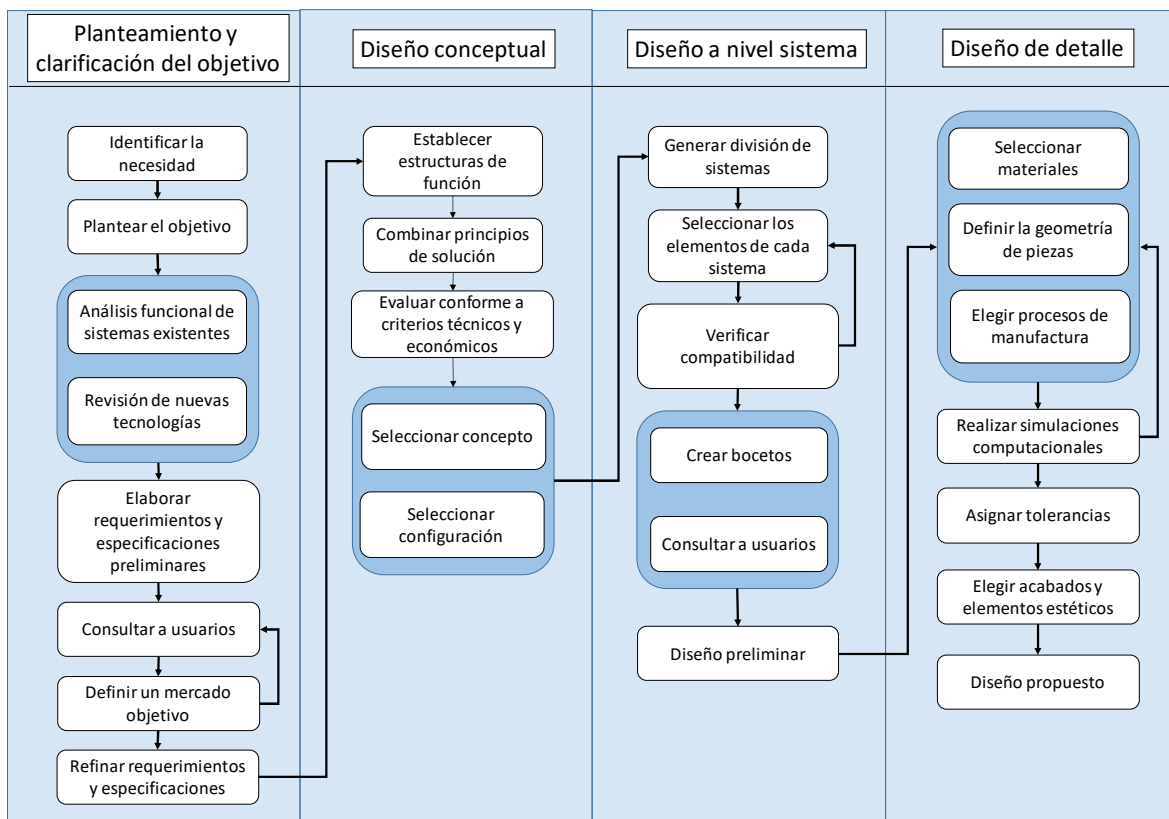


Figura 13 Metodología de diseño utilizada

3. Identificación de la necesidad

La sustentabilidad de la producción de guitarras es la principal necesidad a satisfacer, puesto que se han realizado estudios que han determinado que, actualmente, la forma en que se fabrican las guitarras acústicas y eléctricas no es sustentable. El desarrollo sustentable debe suplir las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades. Al extraer recursos para generar un producto, el primer efecto dañino para el ambiente es el agotamiento de estos recursos, lo que genera problemas sociales y económicos para futuras generaciones (Vezzoli & Manzini, 2008). Esto se relaciona con el ciclo de vida del producto, su tasa de producción y la capacidad de renovación de los recursos.

Materiales comúnmente usados en las tapas del cuerpo de la guitarra, como la madera de abeto o cedro, provienen de árboles de más de 200 años de edad (French & Handy, 2006). Por otro lado, maderas como la caoba, arce, palo rosa y ébano - comúnmente utilizadas en el cuerpo de guitarras eléctricas y en diapasones - vienen de árboles que ahora se encuentran protegidos por ser especies amenazadas (Ahvenainen, 2018). Estos factores señalan que este tipo de instrumentos musicales de madera son productos no sustentables con el ritmo de producción actual. Debido a esto, varios investigadores han analizado las propiedades mecánicas de algunas de las maderas típicamente usadas en instrumentos musicales - referidas en inglés como *tonewoods* - para encontrar materiales alternativos para crear guitarras con un buen desempeño acústico. Ahvenainen presentó una lista de maderas no amenazadas que están disponibles y son recomendadas para su uso en la manufactura de guitarras eléctricas (Ahvenainen, 2018).

Por otro lado, Yano mostró que hojas delgadas de cedro japonés tratadas con resina pueden dar un desempeño similar al del palo rosa brasileño como tapas traseras de guitarra acústica (Yano, Furuta, & Nakagawa, 1996). Considerando que el cedro japonés se reproduce fácilmente y crece rápidamente, puede ser una muy buena alternativa para avanzar en el desarrollo sustentable de guitarras acústicas y eléctricas semi-huecas.

Aunque los trabajos previos han contribuido al desarrollo sustentable de la industria de guitarras eléctricas, el cambio de materiales es necesario, pero puede no ser suficiente; es necesario generar un diseño sustentable. El mayor impacto ambiental de un producto como la guitarra eléctrica se da durante las etapas de preproducción, producción y distribución. Una forma de minimizar el impacto ecológico y los recursos utilizados durante las etapas de producción y distribución es extender la vida útil de producto. Para lograr esto, es recomendable diseñar productos de uso intenso. Cualquier producto que logre ser utilizado intensivamente tiene la capacidad de reducir la cantidad de productos similares en un momento y lugar específico (Vezzoli & Manzini, 2008). Por lo tanto, es necesario diseñar una guitarra eléctrica de uso intenso con un impacto ambiental reducido.

4. Objetivo de la tesis

Analizar el contexto histórico de las guitarras eléctricas y las funciones que cumplen cada uno de sus elementos y, a partir de esto, diseñar un instrumento funcional con un impacto ambiental reducido.

A continuación se presenta una lista de objetivos específicos.

- Investigar las necesidades de un mercado objetivo.
- Diseñar una guitarra eléctrica que incorpore elementos de ergonomía, que brinden mayor comodidad al usuario.
- Dotar al instrumento, mediante el diseño a proponer, de una geometría y características que puedan resultar atractivos para músicos que toquen múltiples estilos musicales.
- Seleccionar los materiales más apropiados para el instrumento, tomando en cuenta su impacto ambiental.
- Validar, mediante simulaciones computacionales el diseño, esto es, comprobar que no se generen deformaciones plásticas en un modelo sometido a condiciones de frontera realistas.

5. Análisis funcional de sistemas existentes

La función primaria de una guitarra eléctrica es brindar al usuario herramientas para hacer música mediante cuerdas metálicas pulsadas de una manera cómoda, esto además de ser visualmente atractiva para el público y el propio guitarrista.

La guitarra eléctrica consta de un cuerpo que brinda soporte estructural a todos los demás elementos, dentro de los que se encuentran un puente y una cejuela – encargados de tensar las cuerdas-, un sistema eléctrico -capaz de enviar la señal del instrumento a un amplificador- y un mástil sobre el que se sitúa un elemento de madera llamado diapasón, en el que se incrustan los trastes (Fig. 14).

El sistema eléctrico de la guitarra está conformado por las pastillas, potenciómetros y selector, mostrados en la Figura 14. El diagrama de la sección transversal del mástil (Fig. 15) presenta el diapasón y el alma, que es un elemento que otorga rigidez y capacidad de ajuste al propio mástil.

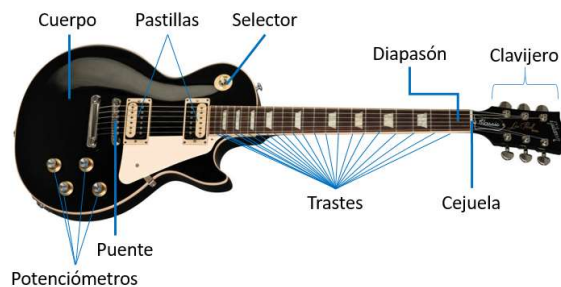


Figura 14 Elementos de la guitarra eléctrica

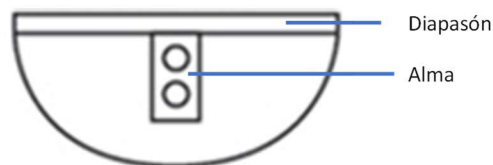


Figura 15 Diagrama transversal de un mástil de guitarra eléctrica

A continuación, se presentará una revisión detallada sobre las características que tienen las guitarras que se encuentran en el mercado actualmente. Esto para tener un panorama amplio y poder elegir entre la vasta variedad de configuraciones que este instrumento puede tener. El análisis funcional de los elementos de la guitarra seguirá el siguiente orden: clavijero, mástil, cuerpo, puente, diapasón y sistema eléctrico/electrónico.

5.1 Sistema de afinación: el clavijero

Para ajustar la tensión de las cuerdas de la guitarra y afinarla se utilizan clavijas, que son colocadas en una zona del instrumento denominada clavijero. Actualmente se fabrican instrumentos con clavijeros situados en diversas configuraciones, pero se puede simplificar el análisis si se divide en dos grandes grupos: guitarras con el clavijero situados en el extremo del mástil (Fig. 16 a) y guitarras con el clavijero situados en el cuerpo, utilizados en las llamadas guitarras *headless* (Fig. 16 b).



Figura 16 Configuraciones de clavijero. a) Clavijero en el mástil (tradicional); b) Clavijero en el cuerpo (*headless*)

Desde que fueron creadas por Steinberger en la década de 1980, las guitarras eléctricas *headless* se han popularizado gracias a que, al colocar las clavijas en el cuerpo del instrumento, se elimina la necesidad de tener un bloque extra de madera en el extremo del brazo. Esto reduce el tamaño y peso del instrumento y ayuda a estabilizar su afinación (Brunson, 2017).

Otra de las ventajas de las guitarras *headless* está íntimamente relacionada con factores ergonómicos; la postura para tocar la guitarra plantea ciertos obstáculos que pueden no parecer muy agresivos *a priori*, pero tienden a provocar problemas de salud a los usuarios. Debido a la geometría y distribución de masa con que cuentan la mayoría de las guitarras, en muchos casos se presenta el denominado *neck dive*, fenómeno en el que el peso del mástil de la guitarra provoca que sta gire dejando el mástil más abajo que el cuerpo, por lo

que el guitarrista debe aplicar una fuerza extra para levantarlo. Se considera que la flexión de la muñeca experimentada por los usuarios al utilizar una guitarra puede provocarles

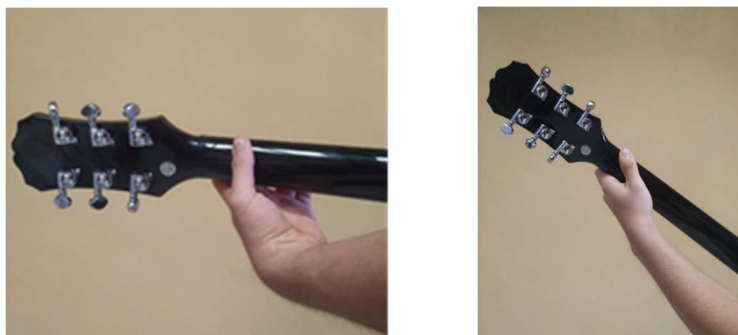


Figura 17 Cambios en la flexión en la muñeca según la inclinación del mástil

lesiones músculo-esqueléticas, esta flexión es especialmente alta cuando se opta por una postura con el mástil prácticamente horizontal (Fig. 17, izquierda), por lo que se recomienda sujetar el instrumento de manera que el mástil cuente con una inclinación de aproximadamente 45° (Fig. 17, derecha), esto implica la aplicación de una fuerza para sostener el mástil y conservar su inclinación (Genani, Molenbroek, & Dekker, 2013).

La configuración *headless* ayuda a aminorar el fenómeno de *neck dive* pues al contar con una menor masa en el mástil, el usuario puede conservar una postura cómoda aplicando una menor fuerza sobre éste. En la Figura 18 se muestra una comparación práctica de susceptibilidad al *neck dive* entre una guitarra tipo Les Paul marca Vintage y una guitarra *headless* marca Goc. A pesar de que la guitarra tipo Les Paul cuenta con un cuerpo pesado, este no basta para posicionar la guitarra a 45° , por otro lado, la inclinación lograda por la guitarra *headless* la hace ser más ergonómica.

Por otro lado, los clavijeros situados en el extremo del mástil dotan a las guitarras de cierto carácter estético y a muchos usuarios les parecen atractivos, por lo que también se presentan múltiples diseños que utilizan este tipo de configuración. Como se observa en la Figura 19, buena parte de los clavijeros tradicionales pueden clasificarse en 2 categorías: aquellos en los que hay dos grupos de 3 clavijas y los que utilizan 6 clavijas en hilera.

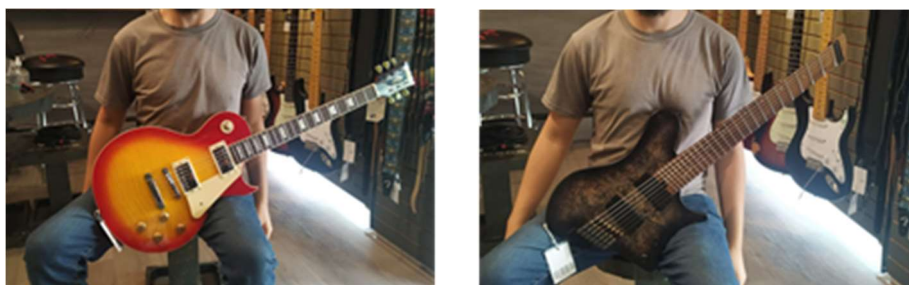


Figura 18 Comparación de susceptibilidad a neck dive



Figura 19 Las dos disposiciones de clavijas más populares: 3 y 3 y 6 en hilera

También existen modelos que utilizan dos hileras de clavijas con otras distribuciones, como el clavijero Music Man mostrado en la Figura 20.

Debido a que los clavijeros de las guitarras *headless* suelen cumplir con las funciones del puente, se presentarán posteriormente, una vez se haya detallado la operación de éste.



Figura 20 Clavijero de una guitarra Ernie Ball Music Man

5.2 Sistema de mástil

El mástil de una guitarra es el elemento con el cual el usuario interactúa durante toda la ejecución, pues desplaza su mano sobre él mientras ésta se lleva a cabo, además, debe soportar las cargas aplicadas por las cuerdas. Debido a esto, la guitarra eléctrica moderna incorpora un refuerzo metálico ajustable dentro de su mástil, la denominada alma de la guitarra, cuyo ajuste logra contrarrestar los cambios de dimensiones de la madera provocados por los cambios de temperatura y humedad a los que está expuesto el instrumento.

Existen dos tipos de alma: aquellas que son de acción simple y las almas de doble acción. Un alma de acción simple permite contrarrestar la tensión de las cuerdas, sin embargo, en ciertas ocasiones el rango de ajuste es inadecuado para su óptima operación. Por otro lado, las almas de doble acción, como las mostradas en la Fig. 21, ofrecen una mayor libertad de ajuste, sin dejar de brindarle rigidez al mástil (Stewart-MacDonald, s.f.).



Figura 21 Almas de guitarra eléctrica

5.2.1 Tipos de mástiles según su construcción

Para construir un mástil de guitarra es posible utilizar una sola pieza de madera que lo abarque en su totalidad, o bien usar múltiples piezas que se adecúen a la geometría del propio mástil y que se encuentren unidas de forma angular o longitudinal.

Los mástiles fabricados a partir de un solo bloque de madera son los que tienen un tiempo de manufactura menor ya que cuentan con menos pasos en su fabricación. Este método es especialmente eficiente al generar mástiles tipo *headless* o con clavijero recto, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22 Esquema de un mástil con clavijero recto (izquierda) y su manufactura a partir de una sola pieza de madera (derecha).

Si bien es complicado generar mástiles de una pieza con clavijeros angulados, hay lauderos que así los fabrican utilizando un gran bloque de madera para cortarlo de manera que se obtenga una aproximación a la vista lateral del mástil (Fig. 23). El proceso de corte de la madera se muestra en la Fig. 24.



Figura 23 Esquema de corte de mástil con clavijero angulado a partir de un bloque de madera

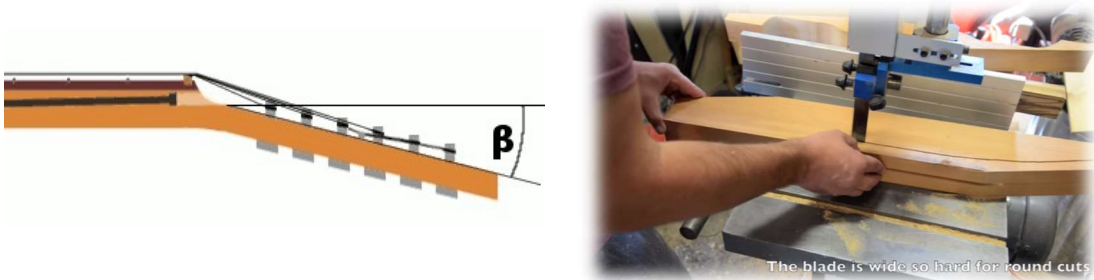


Figura 24 Esquema de un mástil con clavijero angulado (izquierda) y su manufactura a partir de una sola pieza de madera (derecha)

Por otro lado, las uniones angulares son ampliamente utilizadas para optimizar el material al manufacturar mástiles con ángulos pronunciados en el clavijero, pues es posible aproximar esta geometría si se unen dos piezas como se observa en la Fig. 25. A pesar del ahorro de material asociado, en algunos casos –como el mostrado en la Figura 26- el adhesivo utilizado en este tipo de construcción falla provocando la separación de las partes involucradas.

Por último, los mástiles que utilizan múltiples piezas colocadas longitudinalmente se caracterizan por contar con un soporte estructural adicional que los hace muy robustos. Esto debido a que sus piezas se manufacturan con diferentes materiales, los cuales se seleccionan de manera que las deformaciones de las piezas se contrarresten entre sí, manteniendo el ajuste óptimo del mástil.

Desde la década de 1920 –previo a la implementación del alma ajustable-, la empresa Martin comenzó a fabricar mástiles reforzados longitudinalmente con maderas más duras –comúnmente ébano- para aportar rigidez estructural. En el proceso de fabricación de estos mástiles se generaba una cavidad en ellos (bajo el diapasón) para incrustar la tira de madera, este arreglo geométrico se muestra en la Figura 27, y, como se observa en la Figura 28, versiones similares fueron utilizadas posteriormente por la misma empresa para reforzar los mástiles con perfiles de acero.

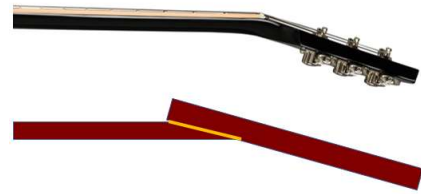


Figura 25 Esquema de un mástil de clavijero angulado por unión de dos piezas



Figura 26 Falla en la unión de piezas de un mástil de dos piezas anguladas



Figura 27 Esquema de un mástil reforzado

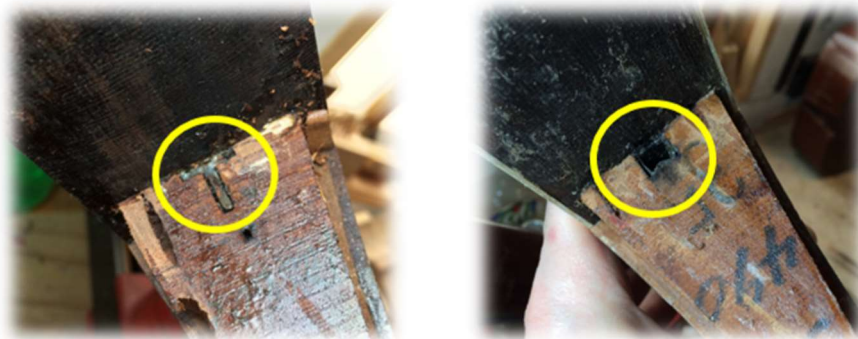


Figura 28 Mástiles reforzados con perfiles de acero

Además de la utilización de diferentes maderas en el mástil, en los últimos años se ha popularizado la utilización de tiras de fibra de carbono para reforzarlo (Stewart-MacDonald, s.f.). Y si bien la disposición geométrica recién comentada continúa utilizándose, su aplicación ha quedado relegada a la reparación de instrumentos cuyos mástiles no cuentan con un alma ajustable. La razón de esto es que, a pesar de que los refuerzos aportan rigidez, las deformaciones producidas por cambios de temperatura no pueden corregirse con esta configuración. El uso del alma ajustable brinda una ventaja sobre la configuración descrita en los párrafos anteriores ya que se pueden corregir estas pequeñas variaciones geométricas.

Dos arreglos comúnmente utilizados para reforzar mástiles que sí cuentan con un alma se presentan en la Figura 29. Las dimensiones de los elementos de refuerzo se determinan según los materiales de éstos y el tipo de perfil del mástil.



Figura 29 Diagramas de mástiles reforzados modernos

5.2.2 Perfiles de mástil

La geometría de la sección del mástil es un factor determinante al hablar de la comodidad que ofrece el instrumento. Dependiendo del tamaño de las manos del guitarrista, así como de su estilo de ejecución, éste puede preferir un perfil de mástil específico. En la Figura 30 se muestran los tipos de perfil más comunes.



Figura 30 Perfiles de mástil

El perfil en U es el más ancho de todos y esto le da una ventaja de sustain -esto es, la guitarra cuenta con la capacidad de mantener un sonido por un tiempo más prolongado, lo que se explicará más adelante-, sin embargo, resulta incómodo para usuarios con manos pequeñas. Por otro lado, los perfiles C y D son ampliamente utilizados gracias a su versatilidad. Finalmente, los perfiles en V ofrecen un mejor acceso a los trastes más cercanos al cuerpo por lo que son del agrado de algunos guitarristas (Vilas Varela, 2019).

Adicionalmente, existen guitarras con mástiles trapezoidales asimétricos, como las abricadas por Strandberg. Según estudios (Genani, Molenbroek, & Dekker, 2013), estos

perfiles brindan una mejor ergonomía que los demás. Sin embargo, pueden resultar intimidantes para ciertos usuarios, por ser completamente diferentes a los demás perfiles.

5.2.3 Radio del diapasón

El diapasón es la pieza en la que se incrustan los trastes y se encuentra colocada sobre el mástil. Mientras que el diapasón de las guitarras acústicas suele ser plano, las guitarras eléctricas incorporan diapasones ligeramente convexos. Como se muestra en la Figura 31, la curvatura del diapasón se mide transversalmente y se expresa mediante su radio. Entre más grande sea el radio, más plano es el diapasón. La curvatura del diapasón afecta directamente a la comodidad que experimentará el usuario según su estilo; mientras que los diapasones de curva pronunciada son recomendables para tocar acordes –conjuntos de notas que se tocan simultáneamente–, los diapasones más planos facilitan el movimiento rápido de los dedos al pasar de una cuerda a otra, así como la aplicación de la técnica de *estirada*, en la que se aplica una fuerza adicional transversal a la cuerda. El radio de diapasón suele encontrarse entre 7.25[in] y 16 [in], además, existen radios compuestos que cambian de radio progresivamente de 12 [in] a 16 [in] (Carr, 2018).

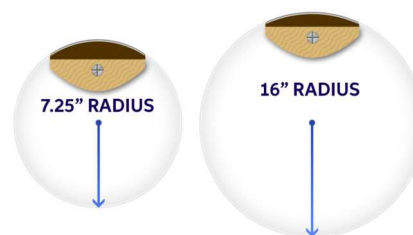


Figura 31 Esquema del radio del diapasón

5.2.4 Método de unión mástil - cuerpo

Como se muestra en la Figura 32, existen 3 tipos de guitarras en lo que a unión mástil-cuerpo se refiere: *bolt-on* –se usan tornillos para unir las piezas–, *set neck* –la unión se lleva a cabo utilizando adhesivos– y *neck-through* –en las que el cuerpo y el mástil no requieren una unión ya que son el mismo elemento (Yamaha Corporation, s.f.). A continuación, se revisarán detalladamente cada uno de estos tipos de unión, así como las ventajas y desventajas que conllevan.



Figura 32 Guitarras con distintos métodos de unión mástil-cuerpo: bolt on (izquierda), set neck (centro) y neck-through (derecha)

- *Bolt-on*

Este método es el que ofrece una mayor facilidad de producción en masa, y es el menos costoso de reparar o ajustar. Además, hace que sea sencillo retirar partes y reemplazarlas al utilizar solamente 3 o 4 tornillos. Algunos de los instrumentos – como el mostrado en la Figura 33, izquierda- que utilizan este método dificultan la ejecución en la zona del mástil más cercana al cuerpo, aunque este problema puede evitarse al utilizar geometrías como la mostrada en la Figura 33, derecha, lo que, sin embargo, conlleva un mayor tiempo de manufactura en esa zona del instrumento.



Figura 33 Guitarras de mástil atornillado

- *Set neck*

Cuando el mástil se encuentra encolado con el cuerpo, se logra un *sustain* mayor – la guitarra consigue mantener sonidos por un tiempo levemente mayor- y comúnmente se tiene un mejor acceso a la zona del mástil más cercana al cuerpo. Sin embargo, las guitarras *set neck* son más difíciles de manufacturar que las de mástil atornillado y en caso de presentar alguna avería en el mástil, es necesario que un laudero experimentado las repare.

- *Neck-through*

Este tipo de instrumentos son especialmente difíciles de fabricar. Si bien suelen manufacturarse con varias piezas, éstas están unidas longitudinalmente, de manera que hay elementos continuos que atraviesan todo el cuerpo y todo el mástil. Esta construcción brinda un *sustain* y una entonación bastante buenos, así como la capacidad de contar con geometrías que resulten muy cómodas para el usuario en la zona en que usualmente se encuentra la unión mástil-cuerpo. Una desventaja importante de esta configuración es que, si el mástil sufre una fractura, la reparación del instrumento resulta mucho más costosa que en cualquiera de las otras dos opciones, además de que, en caso de reforzar el mástil con una pieza extra, se pierde la ventaja de *sustain* que ofrece el instrumento (Owens, The 3 Neck Attachment Methods You Should Know, s.f.).

5.3 Sistema de cuerpo

El cuerpo de la guitarra es uno de sus elementos más importantes, pues lleva a cabo funciones estéticas tanto visuales como sonoras, además de fungir como uno de los pilares estructurales del instrumento. El cuerpo puede ser completamente sólido o totalmente hueco, aunque también existe una variante intermedia: las llamadas guitarras semi-huecas.

Una guitarra de cuerpo sólido no cuenta con caja de resonancia, lo que le permite mantener sonidos por un tiempo levemente mayor que el que se lograría con un cuerpo hueco – esto es, tiene mayor *sustain*-. La ausencia de caja provoca que este tipo de instrumentos dependan en gran medida de equipos de amplificación. Es importante mencionar la facilidad de su manufactura, además de su adaptabilidad a diversas geometrías (de Looper, 2019). Esta diversidad de geometrías puede observarse en la Figura 34.



Figura 34 Guitarras de cuerpo sólido

Por otro lado, un cuerpo hueco cuenta con una retroalimentación acústica que provoca que la guitarra pueda utilizarse tanto conectada como desconectada a un amplificador. Esta retroalimentación puede convertirse en un problema al utilizar el instrumento cerca de un altavoz ya que las ondas sonoras que interactúan en la caja de resonancia –que idealmente serían sólo las generadas por la vibración de las cuerdas- se mezclan con las generadas por el propio altavoz, lo que conduce a que las cuerdas vibren nuevamente y los sonidos producidos sean amplificados, convirtiéndose en un ciclo iterativo (Wired Guitarrist, 2019). A pesar de que las guitarras de cuerpo hueco tienen un menor *sustain*, algunos usuarios las prefieren debido a los tonos graves que ofrecen. La Figura 35 muestra una guitarra de cuerpo hueco.



Figura 35 Guitarra Ibanez AG75BS de cuerpo hueco

Las guitarras semi-huecas (Fig. 36) constan de un cuerpo sólido central y cuerpos huecos – comúnmente 2- situados a los costados de éste. Aunque este tipo de instrumentos también presenta problemas de retroalimentación acústica, no llegan al extremo de las guitarras

huecas. Al encontrarse en un punto intermedio, proveen al usuario un sonido resonante y cálido sin sacrificar tonos medios y agudos (de Looper, 2019). Además, el soporte estructural que brinda el cuerpo sólido central permite la utilización de geometrías diferentes a las utilizadas en cuerpos completamente huecos.



Figura 36 Guitarras de cuerpo semi-hueco

5.4 Sistema de entonación

5.4.1 Trastes

Para explicar a detalle la forma en que operan los trastes es necesario revisar el comportamiento sonoro de una cuerda vibrante, que está descrito por la Ley de Mersenne (Varieschi & Gower, 2010).

$$f_n = \frac{n}{2L_0} \left(\frac{T}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde

f : Frecuencia de vibración

L_0 : Longitud de cuerda vibrante

(distancia de la cejuela al puente)

T : Fuerza de tensión

μ : Masa por unidad de longitud

n : Indicador de armónicos

$n = 1 \rightarrow$ Frecuencia natural

$n \in N$

A cada sonido le corresponde una frecuencia de vibración específica y cada instrumento musical puede generar sonidos que se encuentran dentro de un intervalo de frecuencias llamado registro. De esta forma, el registro de una guitarra eléctrica en afinación estándar va de 82 a 1318 Hz; en contraste, el registro de un violín va de 196 a 659 Hz. (Deimos, s.f.). Es importante señalar que las notas musicales tienen asignadas frecuencias estandarizadas, a pesar de que a todo sonido le corresponde una frecuencia de vibración, no todos los sonidos son notas musicales.

En una interpretación musical, el ejecutante debe hacer vibrar las cuerdas a frecuencias específicas, correspondientes a los sonidos de la obra. Como indica la Ley de Mersenne, esto se logra modificando la longitud de cuerda vibrante según sea requerido; en

instrumentos como el violín esto implica que el intérprete debe saber exactamente en qué parte del mástil debe poner sus dedos para generar una nota musical, ya que el violín no tiene trastes; esto puede provocar que la interpretación esté desafinada a pesar de que el instrumento esté perfectamente afinado. En la guitarra, en cambio, la inclusión de trastes desde su fabricación simplifica el uso del instrumento pues cumplen la función previamente descrita.

Para calcular la posición de los trastes, se parte de la teoría musical: a la nota cuya frecuencia de vibración es el doble de otra se le llama octava; este término también se utiliza para referirse al intervalo de frecuencias entre ambas notas. En una escala musical temperada, una octava es dividida entre 12 notas, esto se representa en la ecuación (2).

$$f_i = f_0 * 2^{-\frac{i}{12}} \quad (2)$$

Considerando que la Ley de Mersenne indica que la frecuencia fundamental de la cuerda vibrante es inversamente proporcional a la distancia del puente a la cejuela y que la frecuencia *i*ésima de una nota está dada por la ecuación (2), la distancia entre el puente y el traste *i*ésimo está indicada por la ecuación (3). Por su facilidad de cálculo, tradicionalmente se posicionan los trastes con base en la ecuación (4), situándose como se muestra en la Figura 37 (Varieschi & Gower, 2010).

L_i : Distancia entre el puente y el traste *i*ésimo

$$L_i = L_0 * 2^{-\frac{i}{12}} \quad (3)$$

$$L_i = L_0 * \left(\frac{17}{18}\right)^i \quad (4)$$

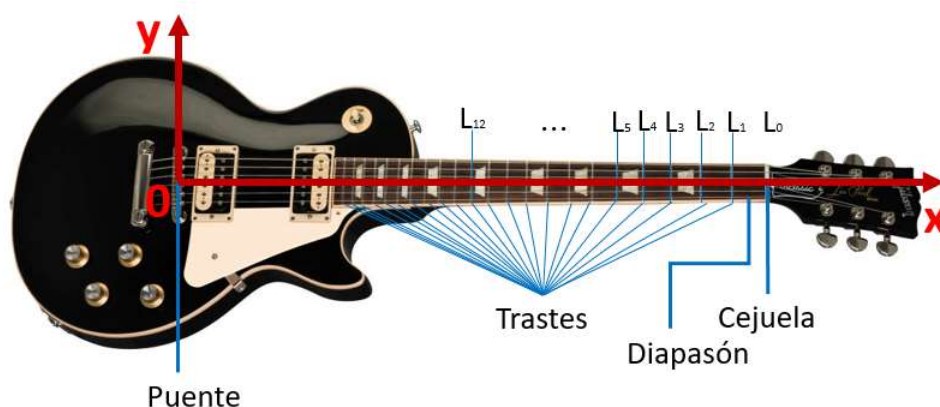


Figura 37 Esquema del sistema de entonación

Tomando en cuenta que un juego de cuerdas de guitarra está compuesto por elementos de grosores y materiales diferentes entre sí, utilizar la misma distancia de la cejuela al puente (L_0) para todas las cuerdas genera errores de entonación. Para compensar estos problemas se han creado puentes con posicionamiento independiente para cada cuerda. Y, a pesar de que los instrumentos de cuerda son fabricados desde hace miles de años, no fue sino hasta la implementación de elementos para amplificar el sonido de las guitarras mediante transductores electromagnéticos, que se popularizó el uso de puentes ajustables, esto debido a que la incorporación de más elementos de ensamble perjudica la sonoridad.

5.4.2 Escala

La escala de una guitarra es la distancia entre el puente y la cejuela –elementos cuyas funciones se explicarán más adelante-. Las escalas estándar de los instrumentos fabricados por Gibson y Fender son 24.75” y 25.5”, respectivamente. Por lo general, las guitarras con una escala corta (24.75” o menor) tienen entre 21 y 23 trastes, pero las que optan por una escala larga (25.5” o mayor), incorporan 24 o incluso más trastes (Vilas Varela, 2019). Esto implica que una guitarra con una escala larga tiene un registro mayor que una con escala corta.

Una técnica utilizada comúnmente al tocar la guitarra eléctrica es el denominado *bending* o *estirada*, que consiste en aplicar una fuerza adicional F_E mientras se está presionando una cuerda, de manera que ésta se estira. La fuerza adicional causa un leve incremento en la tensión a la que está sometida la cuerda, lo que provoca que la frecuencia de vibración de la cuerda aumente –esto es, el sonido que produce se hace más agudo-. Si se asume que la distancia entre la cuerda y el diapasón es muy pequeña, la distancia que la cuerda recorre en esta dirección se puede despreciar. La ecuación (6) describe la frecuencia de la cuerda respecto al ángulo del *bending* θ (Grimes, 2014).

$$f_B = \frac{\cos \theta}{2L_0} \left(\frac{T + F_E}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

De la ecuación (6) se desprende que F_E es directamente proporcional a L_0 , es decir, a la escala del instrumento, por lo que en guitarras de escala corta es relativamente más fácil realizar *bendings* que en guitarras de escala larga. Esto también determina el calibre de cuerdas que es más cómodo utilizar con cada instrumento.

También existen guitarras multiescala (Fig. 38), que cuentan con varias longitudes de escala diferentes. Su manufactura es



Figura 38 Guitarra multiescala

más complicada que las guitarras previamente analizadas pues sus trastes no son paralelos, sino que se encuentran angulados. Estas guitarras cuentan con una cierta popularidad entre guitarristas que usan cuerdas más gruesas y en ocasiones, incluso más de 6 cuerdas.

5.4.3 Puente

El puente es el elemento encargado de tensar las cuerdas en el extremo opuesto a la cejuela y es muy importante para entonar la guitarra, así como para regular su *acción* –es decir, la separación entre las cuerdas y el diapasón, aunque existen modelos con capacidades de ajuste limitadas como el mostrado en la Figura 39–.

Los puentes se pueden clasificar según su capacidad de variar la tensión aplicada a las cuerdas en: i) los que mantienen una tensión constante son denominados fijos; ii) aquellos que permiten disminuir momentáneamente la tensión se les llama semi-flotantes y iii) los puentes flotantes añaden al anterior la posibilidad de aumentar esta fuerza.



Figura 39 Puente fijo sencillo

5.4.3.1 Puentes Fijos

En relación con los puentes fijos, se han desarrollado distintos tipos con ajuste de posición individual para cada cuerda. Dos de los más comunes y descritos a continuación, son el Tune-o-matic y el Hardtail (Figs. 40 y 41), presentes en los modelos más icónicos de las marcas Gibson y Fender, respectivamente.

El puente Tune-o-matic (Fig. 40), cuenta con una pieza alargada con múltiples canales, que actúan como rieles para el deslizamiento de las silletas que tensan las cuerdas. Aunque existen guitarras con puente Tune-o-matic en las que las cuerdas atraviesan el cuerpo, este puente se utiliza típicamente en conjunto con otra pieza llamada tiracuerdas, la cual se encarga de sujetar las cuerdas. Para posicionar las silletas que tensan las cuerdas se utilizan tornillos. Estos puentes se pueden encontrar comercialmente fabricados con diferentes materiales; los hay de acero niquelado, cromado e incluso, recubierto con oro (Gotoh, 2018).

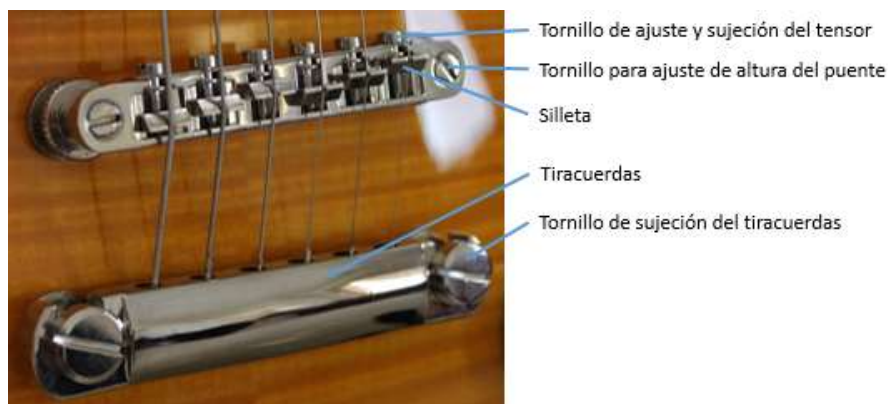


Figura 40 Elementos del puente tipo Tune-o-matic.

El puente tipo Hardtail (Fig. 41), consta de una base, comúnmente de chapa metálica, ensamblada con tensores para cada cuerda. Dependiendo del tipo de guitarra, las cuerdas pueden sujetarse directamente de la base del puente o atravesar completamente el cuerpo de la guitarra y el mismo puente. Cada tensor cuenta con un tornillo y un resorte para unirlo a la base del puente; esta unión no es completamente rígida ya que permite un ajuste de altura de la silleta (comúnmente mediante otros dos tornillos).

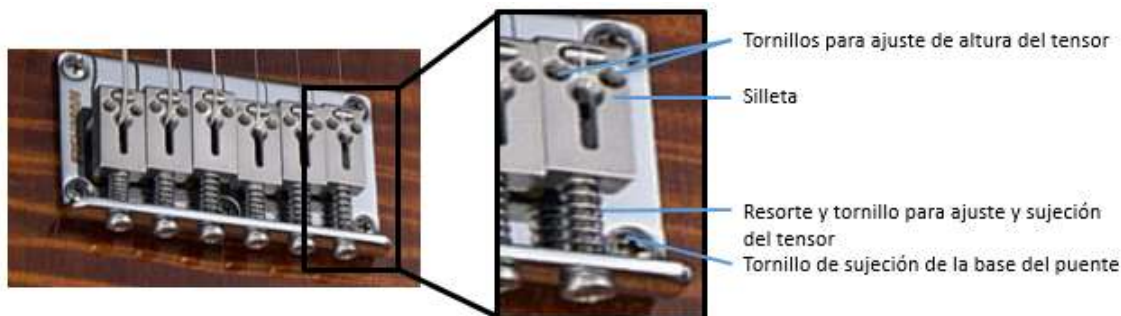


Figura 41 Elementos del puente tipo Hardtail

Los modelos recién comentados son utilizados en guitarras con clavijeros situados en el mástil; en cuanto a guitarras *headless*, hay puentes como el mostrado en la Figura 42 que son parecidos al recién comentado Hardtail, con la salvedad de incorporar elementos para realizar la afinación del instrumento desde el puente.



Figura 42 Puente fijo headless marca Hipshot

Strandberg utiliza el puente presentado en la Figura 43, que está conformado por grupos de piezas que operan individualmente para cada cuerda. El ajuste de este modelo requiere reducir la tensión aplicada a cada cuerda hasta que sea posible retirarla y manipular los elementos del puente. Si bien el ajuste de este tipo de puente es más complicado que los anteriormente revisados, ofrece la ventaja de poder utilizarse en instrumentos con diferentes números de cuerdas.



Figura 43 Puente Strandberg (izquierda) y sus elementos de ensamble (derecha)

5.4.3.2 Puentes Semi-flotantes

Como ya se dijo, este tipo de puentes ofrecen al usuario la capacidad de reducir la tensión de las cuerdas de forma momentánea –produciendo sonidos levemente más graves-, para luego recuperar su tensión previa. La mayoría de los puentes semi flotantes del mercado son muy parecidos al llamado trémolo sincronizado, desarrollado por Fender (Fig. 44). Para lograr su cometido, estos dispositivos se valen de muelles colocados en la parte trasera del cuerpo de la guitarra, lo que requiere generar cavidades en éste, reduciendo considerablemente su *sustain*. Debido a que cuando se cambia la tensión aplicada a cuerdas éstas pueden recorrerse respecto a la cejuela, su dirección de deformación cambia. Esto, aunado a la fuerza de fricción entre la propia cejuela y las cuerdas hace que las cuerdas no regresen perfectamente a su posición inicial, causando desafinaciones.



Figura 44 Fender Stratocaster con puente semi flotante trémolo

El Bigsby es un dispositivo que, si bien no es un puente como tal, posibilita que las guitarras que lo incorporan disminuyan su tensión momentáneamente. Como se muestra en la Figura 45, este tipo de tiracuerdas cuenta con un muelle que soporta constantemente la carga ejercida por las cuerdas, y que tiene la capacidad de comprimirse aún más cuando el usuario

aplica una fuerza sobre la palanca, para regresar a su posición inicial cuando esta fuerza extra es retirada. Los tiracuerdas tipo Bigsby no requieren de cavidades en el cuerpo de la guitarra.



Figura 45 Gibson Les Paul con tiracuerdas Bigsby

5.4.3.3 Puentes Flotantes

Los puentes que permiten aumentar y disminuir la tensión de las cuerdas suelen acompañarse –en guitarras de clavijero tradicional- de cejuelas bloqueantes como la mostrada en la Figura 46. Una cejuela bloqueante sujeta las cuerdas en el extremo del mástil para evitar las desafinaciones descritas en la sección de puentes semi-flotantes. Al sujetar firmemente las cuerdas con la cejuela la tensión de éstas se incrementa levemente, para regularla y dejar las cuerdas apropiadamente afinadas, los puentes flotantes Floyd Rose – como el mostrado en la Figura 46- cuentan con micro-afinadores.

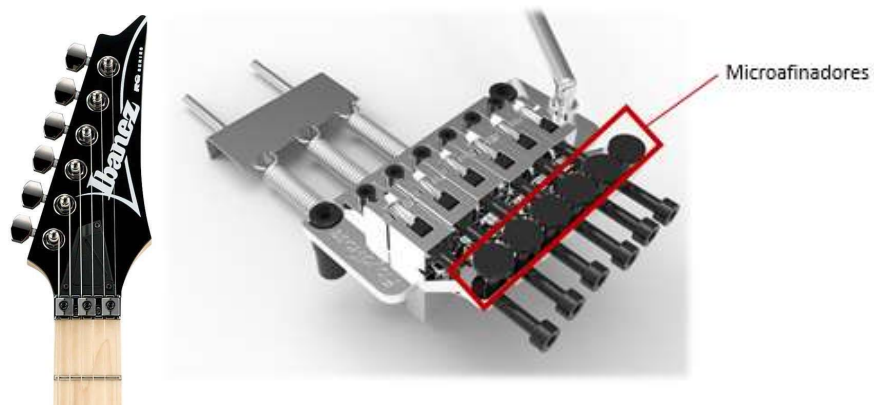


Figura 46 Mástil de una guitarra Ibanez con cejuela bloqueante (izquierda) y puente Floyd Rose con microafinadores (derecha)

En la Figura 46 se observa que el sistema original de Floyd Rose se vale de resortes para operar; estos resortes se colocan en una cavidad en la parte trasera del cuerpo de las guitarras –de manera homóloga al trémolo sincronizado-. Floyd Rose lanzó al mercado en 2014 un modelo que no requiere de ninguna cavidad para operar, pues –como se muestra en la Figura 47- funciona con un muelle situado sobre el propio cuerpo de la guitarra. El Floyd Rose FRX, entonces, presenta una ventaja sobre los modelos previamente comentados: minimiza las desafinaciones de los puentes no-fijos sin perder *sustain*.



Figura 47 Guitarra con puente Floyd Rose FRX

Si bien los micro-afinadores regulan la tensión de las cuerdas, no pueden reemplazar al clavijero, por lo que modelos como los recién comentados no se utilizan en guitarras *headless*. En guitarras de este tipo no se necesita de una cejuela bloqueante especial ya que –al no haber un clavijero en el extremo del mástil- el cambio de dirección de la cuerda no genera problemas de afinación significativos.

Un diseño similar al trémolo sincronizado es utilizado por Hipshot en su trémolo para guitarras *headless* (Fig. 48).



Figura 48 Puente trémolo headless marca Hipshot

5.5 Sistema eléctrico-electrónico

5.5.1 Pastillas

Las pastillas, cápsulas o *pickups* de una guitarra eléctrica juegan un papel importante en el sonido que ésta puede producir, pues son los elementos encargados de transducir la vibración de las cuerdas metálicas en una señal eléctrica. Existen diversos tipos de pastillas, las más utilizadas son aquellas que incluyen imanes.

Una pastilla magnética opera de la siguiente manera: cuando las cuerdas metálicas de la guitarra vibran, su movimiento produce un cambio en el campo magnético de la pastilla, que es transducido en una señal de voltaje variable. La variación del voltaje depende de la amplitud y velocidad de la vibración de la cuerda. En esta configuración, los polos del imán están conectados por líneas de campo invisibles. Cuando la cuerda se mueve perpendicularmente a estas líneas, se produce un voltaje en la bobina, como lo indica la Ley de Faraday, y de acuerdo con esta misma ley, el voltaje generado incrementará proporcionalmente con el número de vueltas del alambre embobinado. Típicamente las pastillas tienen más de 6000 vueltas de alambre embobinado. Se utiliza alambre delgado para aumentar el número de vueltas sin aumentar el tamaño. Nótese que el movimiento de la cuerda paralela a las líneas de campo no será correctamente detectado (Kubilay, 2018). La disposición de estos elementos se muestra en la Figura 49.

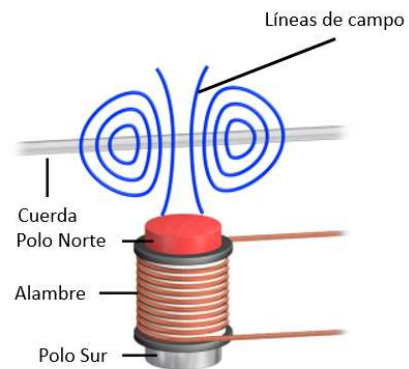


Figura 49 Diagrama de funcionamiento de una pastilla electromagnética

Por otro lado, existen otros tipos de pastillas que se basan en distintos principios de funcionamiento, como la utilización de materiales piezoeléctricos o fotosensibles -incorporados en las llamadas pastillas ópticas-. Y si bien ambos captan la señal íntegra de la vibración de las cuerdas –esto es, no desprecian las oscilaciones paralelas al cuerpo de la guitarra- permiten además el uso de cuerdas no-metálicas, las pastillas magnéticas son las que tienen una mayor presencia en el mercado.

Las pastillas magnéticas más sencillas son las llamadas *single coil* (Fig. 50a), que cuentan con 6 imanes cilíndricos, uno para cada cuerda. La bobina que envuelve a los imanes actúa como una antena y es susceptible a captar ruido electromagnético presente en el ambiente. Para aminorar este problema, existen



Figura 50 Pastillas electromagnéticas. Single coil (a) y humbucker (b)

pastillas que incorporan una segunda bobina que se encuentra enrollada en sentido contrario. Gracias a la disminución de ruido conseguida con esto, estas pastillas son denominadas *humbuckers* (Fig. 50b). Además, existen pastillas que utilizan pilas para pre-amplificar la señal obtenida del instrumento, estas son denominadas pastillas activas.

5.5.1.1 Sub-sistemas para aumentar versatilidad

El voltaje de salida de la guitarra es directamente proporcional al número de vueltas de la bobina de las pastillas. Así, el voltaje obtenido de las cápsulas de doble bobina es mayor al de las de bobina simple. Además, existen pastillas -tanto simples como dobles- que se fabrican con un número mayor de vueltas de bobinado. Estas son llamadas pastillas *calientes* y, como puede inferirse, las señales que producen cuentan con voltajes mayores a los correspondientes a una pastilla convencional. El voltaje de salida de una cápsula es determinante en el sonido obtenido de ella; las cápsulas de voltaje reducido suelen producir un sonido más *limpio* que las cápsulas *calientes*.

Si bien las pastillas de doble bobina -especialmente aquellas que son *calientes*- brindan características deseables para ciertos estilos musicales como el rock pesado y heavy metal, su elevado número de vueltas de bobinado limita su capacidad de obtener sonidos *limpios*. Debido a esto, se han desarrollado sistemas que permiten incrementar la versatilidad sonora de un instrumento con *humbuckers*. Estos sistemas son llamados *coil split* y *coil tap*. El primero permite obtener el sonido de una pastilla de bobina simple cuando se utiliza una *humbucker*, al inhabilitar una de sus bobinas. Mientras que el *coil tap* añade un cable a la pastilla -que suele situarse a la mitad del bobinado- para enviar una señal de voltaje menor. Es importante mencionar que el *coil tap* no brinda un sonido de bobina simple, pues es una bobina doble con una fracción de las vueltas totales de la cápsula. El sistema *coil split* goza de una mayor popularidad ya que otorga una versatilidad mayor que el *coil tap* (Hodge, 2019). Para accionar un sistema de *coil split* o *coil tap* es común utilizar switches tipo *push-pull*.

5.5.1.2 Pastillas activas

Las cápsulas magnéticas revisadas en los párrafos previos son llamadas pastillas pasivas, esto debido a que la señal eléctrica que envían está dada únicamente por la transducción del movimiento de las cuerdas al vibrar. Por otra parte, las pastillas activas, como la EMG mostrada en la Figura 51, incorporan un sistema electrónico de pre-amplificación -que requiere de alimentación eléctrica, típicamente provisto por una o dos pilas de 9V, lo que les permite tener un número mucho menor de vueltas de bobinado (Bowcott, 2020).



Figura 51 Pastilla activa marca EMG

5.5.2 Posición de las pastillas

Es común utilizar múltiples pastillas en una sola guitarra, de esta forma es posible elegir –e incluso combinar- los sonidos de cápsulas con diferente bobinado y que se encuentran a distancias diferentes del puente del instrumento. La influencia de la posición de las pastillas se debe al comportamiento oscilatorio que presenta una cuerda al ser pulsada. En la Figura 52a el esquema de una guitarra con posiciones para pastillas P1 y P2 muestra como vibra armónicamente la cuerda al ser pulsada *al aire*, esto es, sin presionarla contra el diapasón. De manera similar, en la Figura 52b se presenta el comportamiento de la cuerda cuando es pulsada mientras se presiona en otra posición. Al comparar los puntos por los que las líneas de P1 y P2 atraviesan las ondas estacionarias, se observa que la vibración de la cuerda tiene un impacto diferente en las pastillas según la posición en que estas se encuentren. Mientras que la cápsula situada en el punto P1 puede transducir la vibración en los cuatro armónicos mostrados, la ubicada en P2 no detecta la vibración de ciertos armónicos en casos específicos que dependen de la posición en que se presione la cuerda contra el diapasón. Es por esto por lo que se dice que las pastillas más cercanas al puente brindan un tono *brillante* y conforme se alejan más de este el tono se vuelve más *oscuro* (Paiva & Välimäki, 2012).

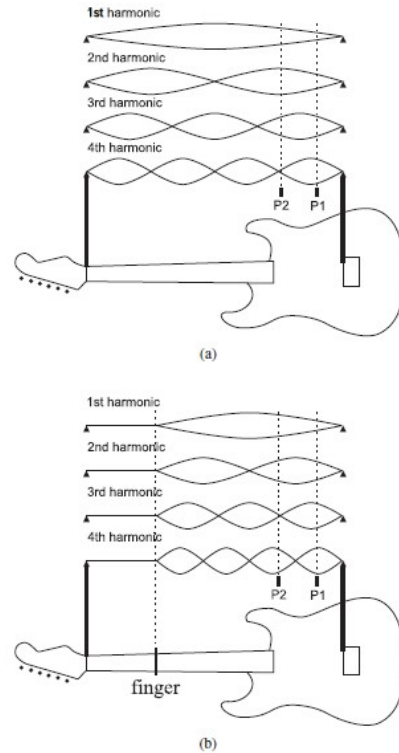


Figura 52 Armónicos captados por las pastillas P1 y P2

En el mercado existen guitarras con diversas configuraciones de pastillas, y, para su nomenclatura, se utilizan las iniciales de single-coil y humbucker –S y H- y se enlistan comenzando por la más cercana al puente, los ordenamientos utilizados por Fender se observan en la Figura 53 (Houghtaling, s.f.).



Figura 53 Guitarras Fender con diferentes configuraciones de pastillas

5.5.3 Selector

En los arreglos de múltiples pastillas comúnmente se incorpora un elemento para que el usuario seleccione cuál cápsula mandará la señal al amplificador. Los switches más utilizados son de palanca y -dependiendo del número de pastillas y combinaciones entre las mismas que se requieran en el instrumento- tienen 3 o 5 posiciones, e incluso se llegan a usar combinaciones entre ellos.

Estos selectores se muestran en la Figura 54. Si bien la versatilidad sonora del instrumento es proporcional a la cantidad de opciones de selección que brinda, entre más parámetros pueda manipular el usuario, el uso del instrumento se vuelve más complejo y puede llegar ser demasiado complicado.

Los selectores tipo palanca son elementos que comúnmente sufren deformación plástica o incluso fractura, por lo que es necesario reemplazarlos. Algunos modelos de la marca PRS - como la guitarra mostrada en la Figura 55- ofrecen una alternativa que disminuye este riesgo, al incorporar un switch rotativo. Este tipo de selector puede beneficiar estéticamente al instrumento pues el espectador lo observa como una perilla más, sin embargo, si se utilizan perillas iguales para el selector y los potenciómetros, el propio usuario puede confundirlos. Además, es importante mencionar que un selector rotativo es más grande que un switch tipo palanca, por lo que requiere de una cavidad mayor en el cuerpo para posicionarse. (Wacker, 2014)

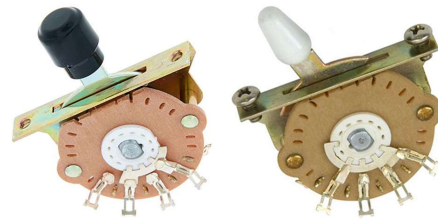


Figura 54 Switches de 3 y 5 posiciones (izquierda y derecha, respectivamente)



Figura 55 PRS Custom 22 con switch rotativo de 5 posiciones

5.5.4 Potenciómetros

La mayoría de las guitarras eléctricas cuentan con potenciómetros para controlar su volumen y tono, operando como divisor de voltaje o como resistor variable, respectivamente. Es posible utilizar potenciómetros para controlar estas variables para cada pastilla independientemente o para manipular la señal de ambas cápsulas.

6. Revisión de nuevas tecnologías

6.1 Manufactura aditiva

Los avances en el campo de la manufactura aditiva, también llamada impresión 3D, han permitido su incorporación en el proceso de fabricación de guitarras. Este tipo de manufactura posibilita el uso de geometrías y materiales no convencionales. Por ejemplo, Odd Guitars vende guitarras de cuerpos poliméricos (Fig. 56, izquierda) (Diegel, 2011). E incluso en 2019 la empresa Sandvik diseñó y fabricó una guitarra con un cuerpo de titanio, el cual fue generado mediante manufactura aditiva (Fig. 56, derecha) (Sandvik AB, 2019).



Figura 56 Guitarras con cuerpos generados por manufactura aditiva. Odd Guitars (izquierda) y Sandvik (derecha)

6.2 Inducción de vibraciones

En 1976, Heet Sound presentó el Energy Bow –o Ebow-, un dispositivo capaz de generar un campo magnético oscilatorio e inducir la vibración de cuerdas metálicas. Como se muestra en la Fig. 57, el usuario sujeta este aparato con la mano con que percute las cuerdas normalmente y, al colocarlo cerca de las cuerdas a la altura de las pastillas electromagnéticas, logra tener un control absoluto sobre el *sustain* de la guitarra, incluso puede generar sonidos con una duración extremadamente larga (Heet Sound Products, s.f.).



Figura 57 Uso del Ebow

En 1985, el ingeniero Michael Brook modificó una guitarra para Edge –guitarrista de la banda U2-. La llamada Infinite guitar contó con un sistema capaz de generar *sustain* infinito (Prendergast, 1990). Un par de años después, compañías como Maniac Music y Fernandes lanzaron al mercado sus propias propuestas, denominadas Sustainiac y Sustainer, respectivamente (Fernandes, s.f.) (Maniac Music , s.f.). A diferencia del EBow, estos sistemas se ensamblan directamente a la guitarra y a veces se encuentran integrados en una de las pastillas de la misma, como se observa en la Figura 58.



Figura 58 Sustainiac

6.3 Puente Evertune

El puente Evertune (Fig. 59) posee un sistema de muelles ajustables que conserva la afinación de una guitarra sin importar los cambios de temperatura o humedad a los que se someta el instrumento. Desde principios de la década del 2010, este tipo de puente se ha popularizado gracias a su estabilidad de afinación (Evertune, s.f.). Cabe mencionar que este puente tiene ciertas desventajas; a pesar de que es un puente fijo, necesita de cavidades extra en el cuerpo de la guitarra para operar –como un trémolo sincronizado o Floyd Rose- y su costo es mayor al de otros puentes fijos. Además, los modelos actuales de puente Evertune solamente funcionan en guitarras de clavijero en el mástil.



Figura 59 Puente Evertune

6.4 Sistemas de fijación de puente flotante

Si bien los puentes flotantes incrementan la capacidad de expresividad del instrumento, limitan la facilidad de hacer cambios de afinaciones. Al estar todas las cuerdas sujetas a una base que tiene movimiento relativo, modificar la tensión aplicada a una cuerda provoca que la tensión de todas las cuerdas cambie. De esta forma, en una guitarra de puente fijo es posible variar la tensión de una cuerda sin preocuparse por las demás, pero en una de puente flotante si se varía la de una hay que afinar todas nuevamente. Por esta razón, se han generado múltiples propuestas para fijar temporalmente los puentes flotantes, de manera que el guitarrista pueda decidir cuándo utilizar cada tipo de puente.



Figura 60 Puente Kahler

Desde finales de los 70s, la empresa Kahler ha fabricado puentes flotantes y con ellos ha competido directamente con Floyd Rose. Los puentes Kahler (Fig. 60) operan con una leva que el usuario puede girar levemente con la barra de trémolo, y que regresa a su posición original gracias a las fuerzas aplicadas por un par de muelles. Estos puentes cuentan con un sistema de bloqueo opcional para evitar que la leva gire.

En 2008, Kevan J. Geier patentó un dispositivo de fijación de puente flotante compatible con puentes de trémolo sincronizado y de tipo Floyd Rose. Actualmente este dispositivo es comercializado con el nombre Tremol-No (Fig. 61).

6.5 Afinadores robóticos

Entre 2008 y 2012 Gibson vendió guitarras modelo Les Paul, SG y Fliyng V con un sistema de afinación robótico. Mediante las silletas de un puente Tune-o-matic modificado se transduce el movimiento vibratorio de las cuerdas en una señal eléctrica, que es analizada por un microcontrolador para comprobar la afinación del instrumento. En caso de que la guitarra no se encuentre en la afinación deseada, el microcontrolador envía una señal al sistema de afinación robótica para corregirla. A diferencia del puente Evertune, los afinadores robóticos (Fig. 62) no solucionan problemas de afinación, pero pueden permitir al guitarrista realizar cambios entre afinaciones alternativas rápidamente (WayBackMachine, 2008).

6.6 Emulación digital

En 2010, la empresa Line 6 puso a la venta su serie de guitarras Variax (Fig. 63), las cuales son capaces de manipular digitalmente la señal individual de cada cuerda. Esto permite emular el timbre de múltiples tipos de pastilla e incluso modificar la afinación de la guitarra sin cambiar la tensión de las cuerdas (Line 6, 2020).

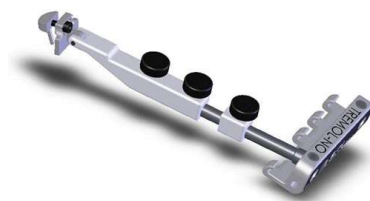


Figura 61 Dispositivo Tremol-No



Figura 62 Clavijero robótico Gibson



Figura 63 Guitarra Line 6 Variax Shuriken y software de emulación

6.7 Pastillas ópticas

En 2017, Light4Sound anunció la pastilla OPik (Fig. 64), que opera mediante sensores ópticos. A diferencia de las pastillas electromagnéticas, la pastilla OPik puede utilizarse con cuerdas de materiales no metálicos y permite regular el volumen de cada cuerda individualmente (Light4Sound, s.f.). Si bien en 2020 es posible adquirir estas pastillas, aún no hay empresas que las incluyan instaladas en sus guitarras.



Figura 64 Pastilla óptica Opik

6.8 Materiales compuestos

Desde 1995, un equipo de científicos holandeses realizó trabajos de investigación y desarrollo para generar un material compuesto con excelentes propiedades acústicas, con énfasis en el *sustain* y la resonancia. El nombre de este material es Arium, y fue utilizado en el 2007 por la empresa Aristides Instruments para fabricar guitarras eléctricas de seis, siete y ocho cuerdas. Estos instrumentos han tenido un recibimiento relativamente positivo dentro de la comunidad de guitarristas, especialmente desde 2013 (Aristides Instruments, 2022). Como se observa en la Figura 65, la construcción de las guitarras Aristides no se vale únicamente del Arium, sino que utiliza múltiples capas de fibra de carbono y fibra de vidrio para formar el cuerpo y el mástil (Aristides Instruments, 2022). Para el diapasón utilizan otro material compuesto, llamado Richlite. Este material es generado a partir de papel reciclado y resina fenólica (Richlite, 2022) y también ha sido utilizado por Gibson y Martin para la fabricación de diapasones de guitarras eléctricas y acústicas, respectivamente.

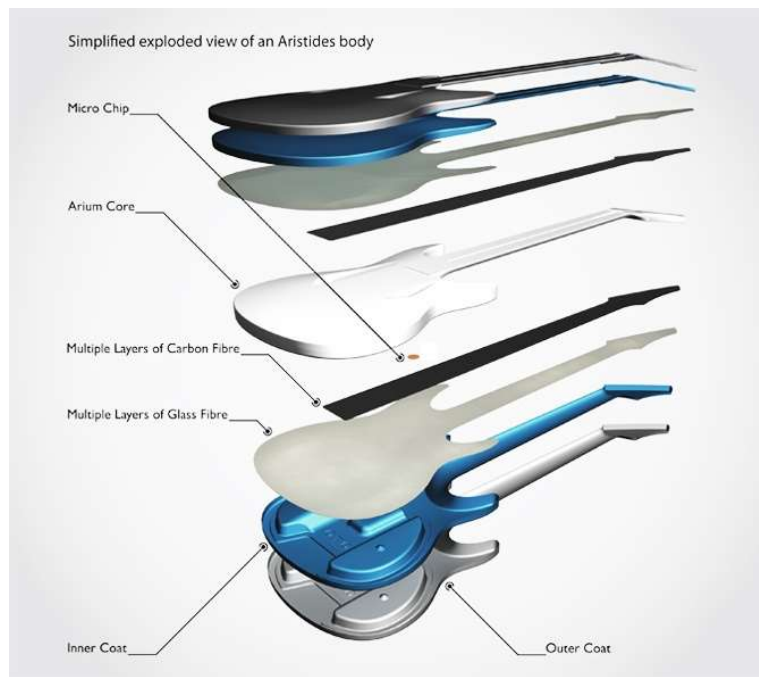


Figura 65 Esquema de construcción de una guitarra Aristides Instruments

7. Planteamiento de requerimientos preliminares

Con base en la revisión histórica y el análisis técnico-realizados, se generó una lista preliminar de requerimientos de diseño de una guitarra.

1. La guitarra debe poder utilizarse con correa.
 2. El mástil debe ser cómodo (facilitar el posicionamiento de la mano izquierda).
 3. La guitarra debe ser visualmente atractiva (geometría y acabados).
 4. La guitarra debe facilitar el cambio de afinaciones.
 5. El mástil debe poder ajustarse para evitar los problemas de deformación asociada a cambios de temperatura.
 6. La guitarra debe ser fácil de transportar.
 7. La guitarra debe ser de fácil mantenimiento.
 8. El cambio de componentes eléctrico-electrónicos debe ser sencillo de realizar.
 9. La guitarra debe ser ligera.
 10. La guitarra debe ofrecer versatilidad sonora.
 11. Los controles deben contar con una configuración ergonómica.
 12. La guitarra debe evitar el *neck dive* (permanecer inclinada).
 13. El puente debe poder ajustar la entonación de cada cuerda independientemente.
 14. La guitarra debe conservar su afinación a lo largo del tiempo.
 15. Los trastes deben ser resistentes al desgaste.
-

8. Conociendo a los guitarristas

Para conocer los gustos, preferencias y necesidades de los usuarios, se realizaron entrevistas y se aplicó una encuesta. Con estas herramientas, se obtuvo información de 122 guitarristas diferentes (12 entrevistados y 110 encuestados) y, aunque hubo una gran variedad y la mayoría tocan múltiples estilos musicales, todos respondieron que tocan algún tipo de rock.

Se observó que, si bien las costumbres particulares de cada individuo y el rol que juega en sus proyectos artísticos influyen en su elección de un instrumento musical, hay ciertos patrones en las preferencias de los guitarristas según los estilos musicales que tocan. En la Fig. 66 se muestra un diagrama que muestra qué geometrías que resultan atractivas para 6 distintos grupos de usuarios.

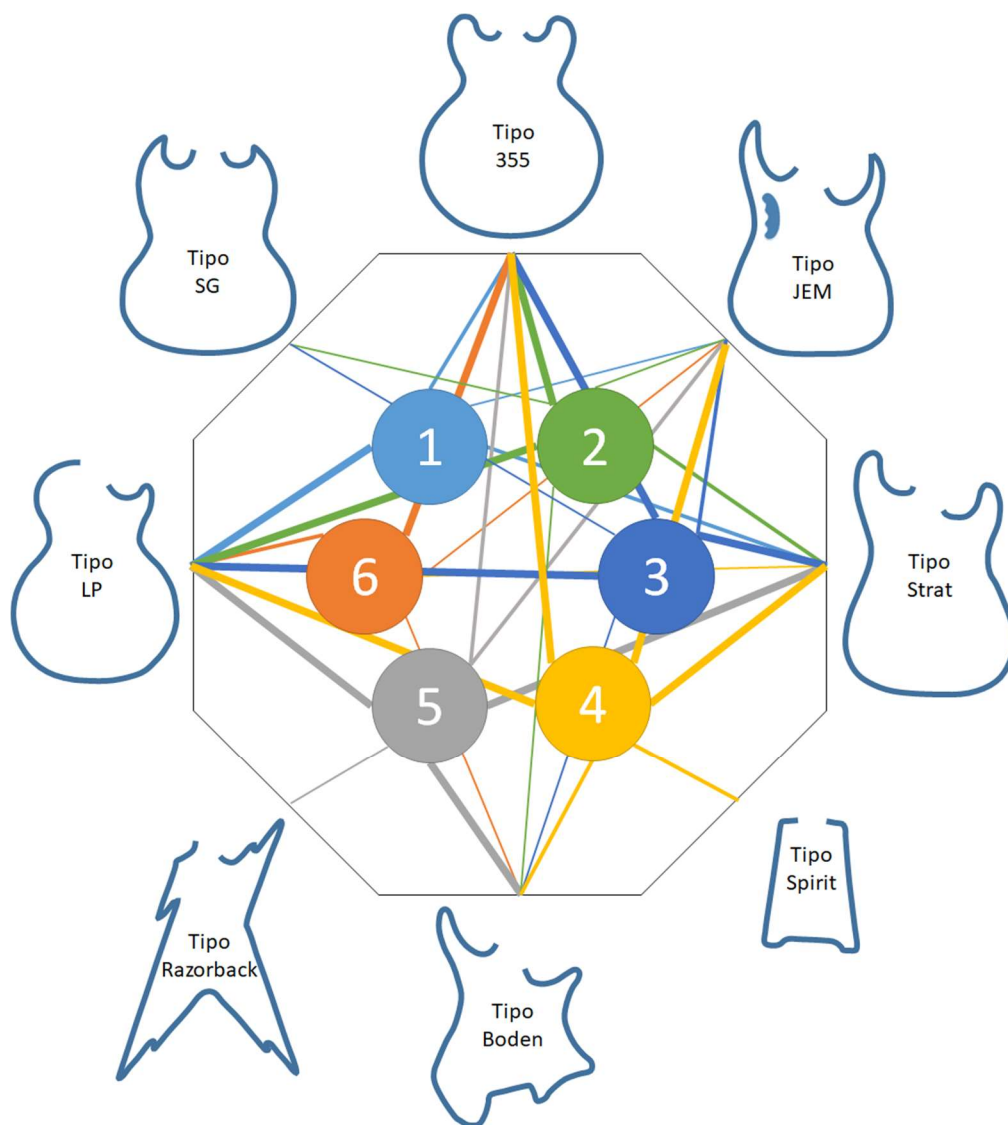
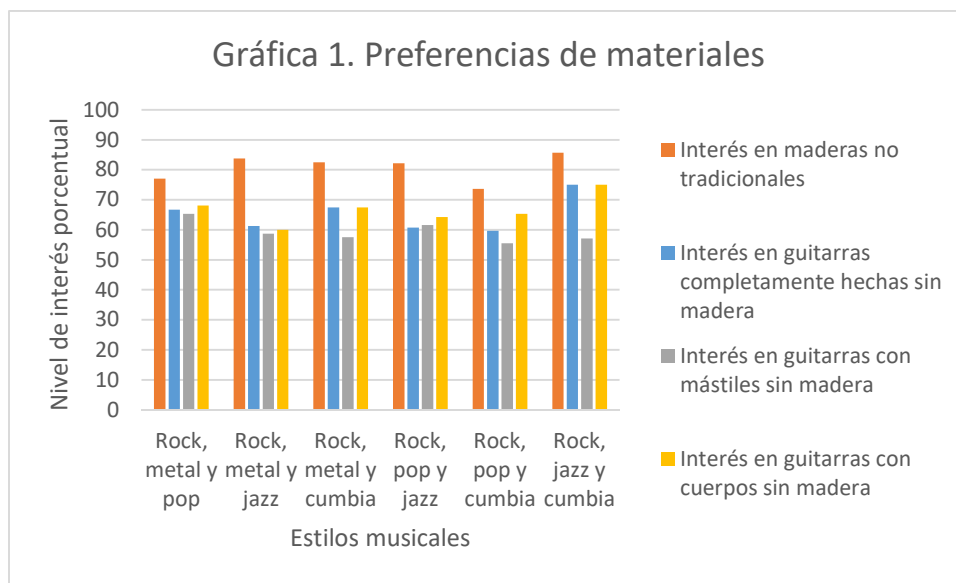


Figura 66 Geometrías preferidas por los usuarios según los estilos musicales que tocan. Los círculos representan a los grupos de usuarios, siendo estos 6: Grupo 1: Rock, metal y pop; Grupo 2: Rock, pop y jazz, Grupo 3: Rock, pop y cumbia, Grupo 4: Rock, jazz y cumbia; Grupo 5: Rock, metal y cumbia; Grupo 6: Rock, metal y jazz. El grosor de las líneas indica el grado de aceptación de cada geometría; entre más gruesa es la línea, mejor la aceptación.

De este análisis se observó que las guitarras Les Paul, 355, Jem y Stratocaster resultaron atractivas, en mayor o menor medida, para los 6 grupos de usuarios. Por otro lado, la guitarra Razorback fue la única de la encuesta con una geometría afilada, y sólo atrajo a unos cuantos usuarios que tocan rock, metal y cumbia.

Como se observa en la Gráfica 1, todos los grupos de usuarios coincidieron en estar más interesados por guitarras fabricadas con maderas no tradicionales, que por guitarras hechas sin madera. Asimismo, los encuestados reportaron estar más interesados en la utilización de materiales alternativos a la madera en el cuerpo de las guitarras que en el mástil. La clasificación según los estilos musicales ejecutados por los usuarios permite realizar

observaciones específicas sobre los intereses de cada segmento. Por ejemplo, el interés de los guitarristas de rock, jazz y cumbia por guitarras hechas sin madera es equiparable al de los músicos de rock, pop y cumbia por guitarras de maderas no tradicionales.



Niveles de interés porcentual manifestados por los usuarios pertenecientes a 6 grupos: Grupo 1: Rock, metal y pop; Grupo 2: Rock, pop y jazz, Grupo 3: Rock, pop y cumbia, Grupo 4: Rock, jazz y cumbia; Grupo 5: Rock, metal y cumbia; Grupo 6: Rock, metal y jazz

Una pregunta de la encuesta aplicada se enfocó en el uso de soportes de pared para sujetar guitarras. Típicamente, estos soportes sujetan la guitarra en el extremo del mástil, en la parte en la que termina el diapasón y comienza el clavijero tradicional, esta es una de las razones por las que las guitarras *headless* cuentan con un poco de material adicional al final del mástil, para poder utilizarse con los soportes estándar. Conociendo esto, resulta intrigante que la mayoría (68%) de los encuestados respondiera que conservan sus guitarras en fundas y sólo el 15% las colocan en soportes de pared. Además, el único grupo que mostró preferencia por la configuración *headless* sobre la tradicional fue el conformado por usuarios que tocan rock, metal y jazz. Este dato resulta especialmente interesante, pues más grupos reportaron estar interesados en guitarras con geometrías típicamente usadas en diseños *headless* (tipo Boden y tipo Spirit).

La información recabada en las entrevistas se presenta en el Anexo III.

9. Selección de un mercado objetivo

La segmentación del mercado permite identificar las necesidades de un público específico. Esto puede realizarse tomando en cuenta factores demográficos como la edad, género, ingresos, ocupación, religión o nacionalidad; factores psicográficos como la personalidad, valores, motivos o intereses; factores de comportamiento de compra (frecuencia y volúmenes de adquisición) y por último, factores relacionados con el producto específico que se desarrolle (Camilleri, 2018).

En este proyecto se utilizaron factores de segmentación demográficos –edad y nacionalidad-, psicográficos –interés por el cuidado del medio ambiente- y de comportamiento de compra, así como algunos factores adicionales como el nivel de experiencia del usuario y el entorno en que se desenvuelve –estudio o eventos, por ejemplo-, así como los estilos musicales que toque en la guitarra eléctrica.

Este diseño se enfocó en guitarristas mexicanos de entre 18 y 30 años, tanto profesionales como músicos amateurs con más de dos años de experiencia, ejecutantes de rock, jazz y cumbia, que utilicen una guitarra eléctrica varias veces a la semana y que estén interesados en guitarras fabricadas con materiales diferentes a los tradicionales.

10. Lista de requerimientos

Pahl & Beitz (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007) describen una metodología donde los requerimientos se clasifican en tres grupos: i) requerimientos básicos -aquellos que el producto debe cumplir obligatoriamente y que para el usuario resultan obvios-; requerimientos de rendimiento técnico – los que son deseados explícitamente por el usuario- y requerimientos de atracción – aquellos que mejoran el producto y que el usuario aprecia, aunque no siempre es consciente de su presencia ni suele estar dispuesto a pagar extra por ellos-.

Por otro lado, el modelo de Kano, citado por Tontini (Tontini, 2007) establece cinco categorías de elementos para determinar la calidad de un producto:

1. Elementos de calidad requerida (*Must-be*)

Su no inclusión causa disgusto en los clientes, pero su presencia no provoca una satisfacción notable, pues se da por sentado que deben estar.

2. Elementos de calidad unidimensional

Provocan satisfacción en los clientes cuando están incluidos y disgusto cuando no lo están. El nivel de satisfacción es directamente proporcional al rendimiento técnico de estos elementos.

3. Elementos de calidad atractiva – Características de entusiasmo

Causan satisfacción en los clientes cuando están incluidos, pero cuando no lo están, no provocan disgusto, ya que son inesperados. Cuando este tipo de características

son desarrolladas adecuadamente, incrementan considerablemente el nivel de satisfacción

4. Elementos de calidad indiferente

No provocan ni satisfacción ni disgusto en los clientes.

5. Elementos de calidad inversa

Provocan disgusto cuando son incluidos y satisfacción cuando no lo son.

Los requerimientos básicos de Pahl & Beitz guardan una estrecha relación con los elementos de calidad requerida de Kano, al igual que los requerimientos de rendimiento técnico y los elementos de calidad unidimensional. Por otro lado, los requerimientos de atracción y las características de entusiasmo son diferentes; mientras que los primeros son inconscientes para el cliente y no está dispuesto a pagar por ellos, las segundas son llamativas y pueden servir para persuadir al cliente de comprar el producto, sin importarle el precio. Los elementos de calidad indiferente y de calidad inversa no cuentan con un equivalente en la metodología de Pahl & Beitz.

Con base en el análisis de las preferencias de usuarios, se complementó la lista preliminar de requerimientos. En la Tabla 2 se presentan todos los requerimientos considerados. Cabe mencionar que en este proyecto se utilizó una clasificación híbrida entre las propuestas de Pahl & Beitz y las de Kano, que consta de cuatro tipos de requerimientos: los básicos (B), los de rendimiento técnico (RT), los de atracción (A) y los de entusiasmo (E). Las características de entusiasmo consideradas fueron aquellas que pueden hacer que la guitarra eléctrica sea un instrumento de uso intenso, esto es, que sus trastes sean duraderos, su puente pueda funcionar como fijo y como flotante según se requiera y sea sencillo realizar modificaciones al sistema eléctrico-electrónico.

Tabla 2. Requerimientos de diseño

#	Tipo	Requerimientos	Importancia según usuarios	Importancia asignada
1	B	La guitarra debe poder utilizarse con correa.	4.41	4.41
2	B	El mástil debe ser cómodo (facilitar el posicionamiento de la mano izquierda).	4.75	4.75
3	B	La guitarra debe ser visualmente atractiva (geometría).	3.33	3.33
4	B	El mástil debe poder ajustarse para evitar los problemas de deformación asociada a cambios de temperatura.	4.75	4.75

5	B	La conexión del cable de salida de la guitarra no debe forzar el cable ni interferir con la posición del usuario. **	-	4
6	B	La guitarra debe poder colgarse en la pared.*	1.83	4
7	RT	La guitarra debe ser fácil de transportar.	3.66	3.66
8	RT	La guitarra debe ser de fácil mantenimiento (ajuste de mástil y entonación).	4	4
9	RT	El cambio de cuerdas debe ser fácil de realizar. **	-	4.5
10	RT	La guitarra debe ser ligera.	3.33	3.33
11	RT	La guitarra debe ofrecer versatilidad sonora.	4.5	4.5
12	RT	Los controles deben contar con una configuración ergonómica.	4.25	4.25
13	RT	La guitarra debe evitar el <i>neck dive</i> (permanecer inclinada).	3.83	3.83
14	RT	El puente debe poder ajustar la entonación de cada cuerda independientemente.	4.58	4.58
15	RT	La guitarra debe conservar su afinación a lo largo del tiempo.	4.58	5.48
16	RT	La guitarra debe facilitar el cambio de afinaciones.	3.7	3.7
17	A	Los elementos metálicos deben ser resistentes a la corrosión.**	-	4
18	E	Los trastes deben ser resistentes al desgaste.	4.25	4.25
19	E	El puente de la guitarra debe poder <i>fijarse o soltarse</i> -pasar de flotante a fijo o viceversa- cuando el usuario quiera, sin necesidad de desarmar el instrumento. **	-	5
20	E	El cambio de componentes eléctrico-electrónicos debe ser sencillo de realizar.	3.75	3.75

Los requerimientos fueron clasificados de acuerdo en 4 tipos: Básicos (B), de rendimiento técnico (RT), de atracción (A) y de entusiasmo (E). Los valores de importancia se encuentran en una escala del 1 al 5, siendo 5 el valor de mayor importancia y 1 el de menor. Se consultó a usuarios experimentados respecto a la importancia de los requerimientos, los valores numéricos de la columna de importancia según los usuarios son los promedios de los datos reportados en esta consulta.

* Cabe mencionar que la mayoría de los usuarios consultados se mostraron indiferentes respecto a colgar la guitarra en la pared; se decidió considerar esto un requerimiento básico pues la mayoría de tiendas físicas de instrumentos musicales presentan tanto las guitarras como los bajos en este tipo de soportes. Por esta razón, la importancia considerada fue mayor a la asignada por los usuarios.

** Estos requerimientos fueron añadidos después de consultar a usuarios, por lo que no su importancia fue asignada a criterio del diseñador.

11. Designación de especificaciones

Si bien los requerimientos establecidos por el cliente pueden dar una idea de qué es lo más importante para el correcto funcionamiento de la guitarra, es más fácil desarrollar el proceso de diseño si se conocen las propiedades medibles que logren garantizar esos requerimientos. Estas propiedades medibles reciben el nombre de especificaciones y se enlistan a continuación:

-
- Factor de seguridad [adim.]
Factor de seguridad que garantice que los esfuerzos aplicados no generen deformaciones permanentes en el cuerpo del instrumento cuando se utilice con correa.
 - Masa [kg]
Masa total de la guitarra.
 - Tiempo de ajuste [min]
Tiempo necesario para cambiar cuerdas, ajustar el alma y el puente de la guitarra.
 - Goniometría [°]
Capacidad de la guitarra de colocarse a 45° de inclinación respecto a la horizontal.
 - Estética [encuesta]
Encuesta para validar que la guitarra sea atractiva estéticamente para el público objetivo.
 - Costo [\$]
Costo de los materiales, componentes y manufactura de la guitarra.
 - Tiempo de manufactura [h]
Tiempo de manufactura del cuerpo y mástil de la guitarra.
-

12. Matriz QFD

Para analizar a detalle la relación entre los requerimientos y las especificaciones, se realizó una matriz QFD (Tabla 3), en la que \ominus , \circ y \blacktriangle son los símbolos para señalar las relaciones fuertes, moderadas o débiles, respectivamente.

Tabla 3. Matriz QFD

			Columna #	1	2	3	4	5	6	7
			Dirección de mejoramiento: Minimizar (▼), Maximizar (▲), o Objetivo (x)	▲	▼	▼	X	▲	▼	▼
Fila #	Importancia relativa	Importancia	Características de calidad (requerimientos funcionales) Calidad demandada (requerimientos de usuario)	Factor de seguridad [adim.]	Masa [kg]	Tiempo de ajuste [min]	Goniometría [°]	Estética [encuesta]	Costo [\$]	Tiempo de manufactura [h]
1	5.0	4.4	La guitarra debe poder utilizarse con correa.	⊖	⊖		○	○		
2	5.3	4.8	El mástil debe ser cómodo (facilitar el posicionamiento de la mano izquierda).				▲	▲	⊖	○
3	3.7	3.3	La guitarra debe ser visualmente atractiva (geometría y acabados).	▲			○	⊖	○	⊖
4	5.3	4.8	El mástil debe poder ajustarse para evitar los problemas de deformación asociada a cambios de temperatura.		▲				○	⊖
5	4.5	4.0	La conexión del cable de salida de la guitarra no debe forzar el cable ni interferir con la posición del usuario.	▲		▲		⊖	▲	○
6	4.5	4.0	La guitarra debe poder colgarse en la pared.		▲		⊖	▲		
7	4.1	3.7	La guitarra debe ser fácil de transportar.	○	⊖					
8	4.5	4.0	La guitarra debe ser de fácil mantenimiento (ajuste de mástil y entonación).			⊖				▲
9	5.1	4.5	El cambio de cuerdas debe ser fácil de realizar.			⊖	▲	▲	○	
10	3.7	3.3	La guitarra debe ser ligera.	⊖	⊖					○
11	5.1	4.5	La guitarra debe ofrecer versatilidad sonora.		▲	○			⊖	○
12	4.8	4.3	Los controles deben contar con una configuración ergonómica.				⊖	○		○
13	4.3	3.8	La guitarra debe evitar el <i>neck dive</i> (permanecer inclinada).	▲	⊖		⊖	⊖		
14	5.1	4.6	El puente debe poder ajustar la entonación de cada cuerda independientemente.			⊖			▲	
15	6.2	5.5	La guitarra debe conservar su afinación a lo largo del tiempo.						⊖	
16	4.2	3.7	La guitarra debe facilitar el cambio de afinaciones.	▲		○				
17	4.5	4.0	Los elementos metálicos deben ser resistentes a la corrosión.					⊖	○	
18	4.8	4.3	Los trastes deben ser resistentes al desgaste.						○	
19	4.2	3.8	El cambio de componentes eléctrico-electrónicos debe ser sencillo de realizar.	▲	▲					⊖
20	5.6	5.0	El puente de la guitarra debe poder fijarse o soltarse -pasar de flotante a fijo o viceversa- cuando el usuario quiera, sin necesidad de desarmar el instrumento.			⊖	○		⊖	
Importancia relativa				222.7	307.0	290.3	246.9	333.4	304.7	493.1

A partir de los valores de importancia relativa obtenidos con la matriz QFD, se calculó su importancia normalizada. Esto, junto a los valores objetivo de los requerimientos, se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Objetivos e importancia de los requerimientos de diseño

	Requerimiento	Especificaciones relacionadas	Objetivo	Importancia relativa	Importancia normalizada
A	▼ Factor de seguridad [adim.]	1, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 19	> 1.2	222.7	0.45
B	▼ Masa [kg]	1, 4, 6, 7, 10, 11, 13, 19	< 4	307.0	0.62
C	▼ Tiempo de ajuste [min]	5, 8, 9, 12, 15, 17	30	290.3	0.59
D	X Goniometría [°]	1, 2, 3, 6, 9, 12, 13, 20	±25%	246.9	0.50
E	▲ Estética	1, 2, 3, 5, 6, 9, 12, 13, 17, 20	Subjetivo (encuesta)	333.4	0.68
F	▼ Costo [\$]	2, 3, 4, 5, 9, 11, 14, 15, 17, 18, 20	<\$15000	304.7	0.62
G	▼ Tiempo de manufactura [h]	2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 19	Indefinido (depende de la configuración)	493.1	1.00

La importancia relativa se normalizó a partir del valor mayor (493.1)

13. Estructura funcional de la guitarra eléctrica

En la Fig. 67 se presenta un diagrama de descomposición funcional de una guitarra eléctrica.

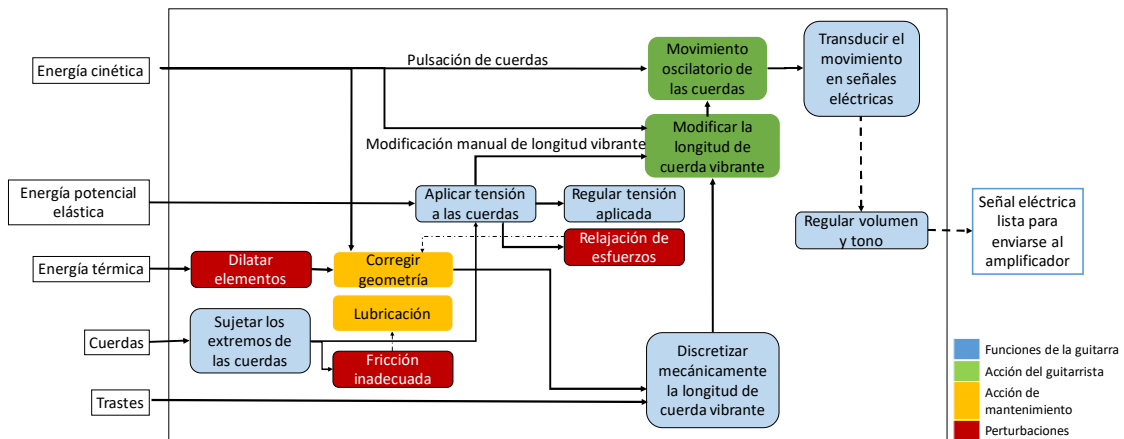


Figura 67 Estructura funcional de la guitarra eléctrica. Los recuadros azules muestran las funciones que debe cumplir la guitarra; los recuadros verdes corresponden a las acciones realizadas por el guitarrista; los recuadros anaranjados indican las acciones realizadas durante el mantenimiento; los recuadros rojos muestran los problemas inherentes al instrumento.

13.1 Principios de solución

La identificación de las funciones principales de la guitarra eléctrica lleva al análisis de los principios de solución para cada una. A continuación se presenta este análisis de las funciones principales.

13.1.1 Sujeción de extremos de las cuerdas

Las cuerdas de guitarra eléctrica cuentan con dos extremos diferenciados. En la Figura 68 se muestran los principios de sujeción identificados para sujetar ambos.

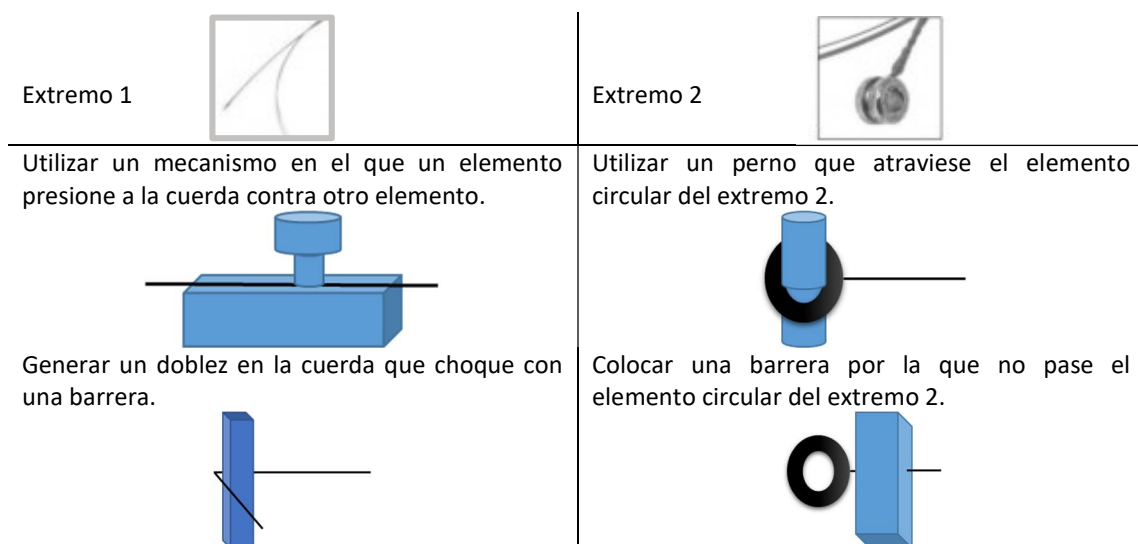


Figura 68 Principios de solución para sujetar los extremos de las cuerdas

13.1.2 Aplicación de tensión a las cuerdas y su regulación

Si bien se deben sujetar ambos extremos de cada cuerda, una de estas sujeciones puede ser fija para facilitar la regulación de tensión en el otro extremo. También es posible colocar un dispositivo de sujeción intermedio, pero esto implica tener reguladores de tensión en ambos extremos. Para regular la tensión aplicada a las cuerdas es posible utilizar mecanismos de desplazamiento rectilíneo o curvilíneo (giratorio).

13.1.3 Discretización mecánica de la longitud de cuerda vibrante

Las guitarras cuentan con un sistema para reducir la cantidad de valores a los que se puede acortar la longitud de cuerda vibrante, llegando a un número finito (cantidad de trastes). Para llevar a cabo esta función, es necesario contar con barreras mecánicas colocadas a lo largo del diapasón. Las barreras pueden generarse mediante la incrustación de elementos metálicos en el diapasón, o incluso al utilizar protuberancias presentes en éste.

13.1.4 Transducción de movimiento en señales eléctricas

La transducción del movimiento de las cuerdas en señales eléctricas puede llevarse a cabo mediante materiales piezoeléctricos, elementos electro-magnéticos e incluso dispositivos ópticos que analicen la frecuencia de vibración de las cuerdas.

14. Combinación de principios de solución

En la Figura 69 se presenta un diagrama en el que se muestra cómo la combinación de los principios de solución mencionados lleva a la creación de guitarras completamente diferentes.

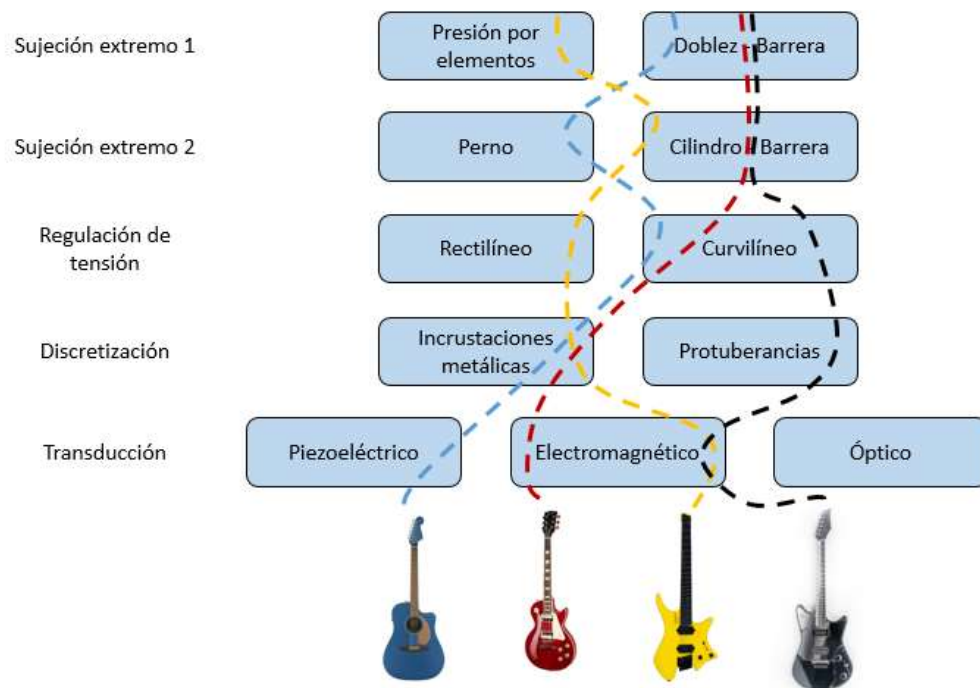


Figura 69 Combinaciones de principios de solución

14.1 Evaluación de principios conforme a criterios técnicos y económicos

14.1.1 Sujeción de extremos de las cuerdas

La sujeción del extremo 1 mediante la presión de dos elementos requiere más piezas, pero brinda una mayor seguridad que el método del doblez. Además, estos métodos no son mutuamente excluyentes, así que el mecanismo que presiona las cuerdas puede actuar como barrera si se genera un doblez en el trozo de cuerda sobrante.

La sujeción del extremo 2 mediante una barrera resulta más conveniente que un perno pues utiliza menos piezas y brinda la misma seguridad.

14.1.2 Aplicación y regulación de tensión aplicada a las cuerdas

Es preferible evitar los cambios en la dirección de deformación de las cuerdas para mejorar la estabilidad de afinación, por lo que se considera que un mecanismo que deforme la cuerda con un movimiento rectilíneo tendrá un mejor funcionamiento que uno basado en movimiento curvilíneo. La selección de este mecanismo está directamente relacionada con la configuración de clavijero elegida; comúnmente, los mecanismos de movimiento curvilíneo se utilizan en guitarras con clavijero tradicional, y los de movimiento rectilíneo en guitarras *headless*. Aunque es posible generar un clavijero de movimiento rectilíneo para una guitarra tradicional, los clavijeros tradicionales estándar son de movimiento curvilíneo.

14.1.3 Discretización mecánica de la longitud de cuerda vibrante

Las incrustaciones metálicas en el diapasón (trastes) son un estándar en la construcción de guitarras eléctricas y su durabilidad y costo se determinan según el material con que estén fabricados. Por otro lado, el uso de un elemento que cumpla las funciones de diapasón y trastes a la vez conlleva un tiempo de manufactura muy alto, debido al nivel de detalle requerido, por lo que sólo es utilizado en instrumentos de lujo.

14.1.4 Transducción de movimiento en señales eléctricas

Los transductores que operan con materiales piezoeléctricos o utilizan sensores ópticos permiten el uso de cuerdas no-metálicas, pero rara vez se utilizan como un sistema de transducción principal. Esto debido en parte a la popularidad de las pastillas electromagnéticas y al poco tiempo que llevan en el mercado las pastillas ópticas. Se utilizarán transductores electro-magnéticos para dotar al instrumento del timbre característico de una guitarra eléctrica.

15. Concepto de diseño

La guitarra por diseñar debe ser un instrumento musical de cuerda pulsada, capaz de utilizar 6 cuerdas de acero niquelado. Debe contar con un cuerpo, mástil y diapasón, y cumplir con las siguientes características:

- Sujeción de cuerdas mediante presión de elementos y método cilindro-barrera.
- Trastes incrustados en el diapasón.
- Transducción mediante pastillas electromagnéticas

16. Diseño de configuración

En la Figura 70 se muestran tres formas distintas de colocar los elementos que sujetan, posicionan y tensan una cuerda; la opción 1 mantiene la cuerda recta sin cambiar de dirección, utilizando solo dos elementos se generan todas las funciones básicas. La opción 2 involucra un cambio de dirección, pues se añade un elemento que está encargado solo de posicionar la cuerda. La opción 3 es la que cuenta con más elementos, pues involucra el uso de una sujeción intermedia, que hace necesaria la incorporación de un segundo elemento regulador de tensión.

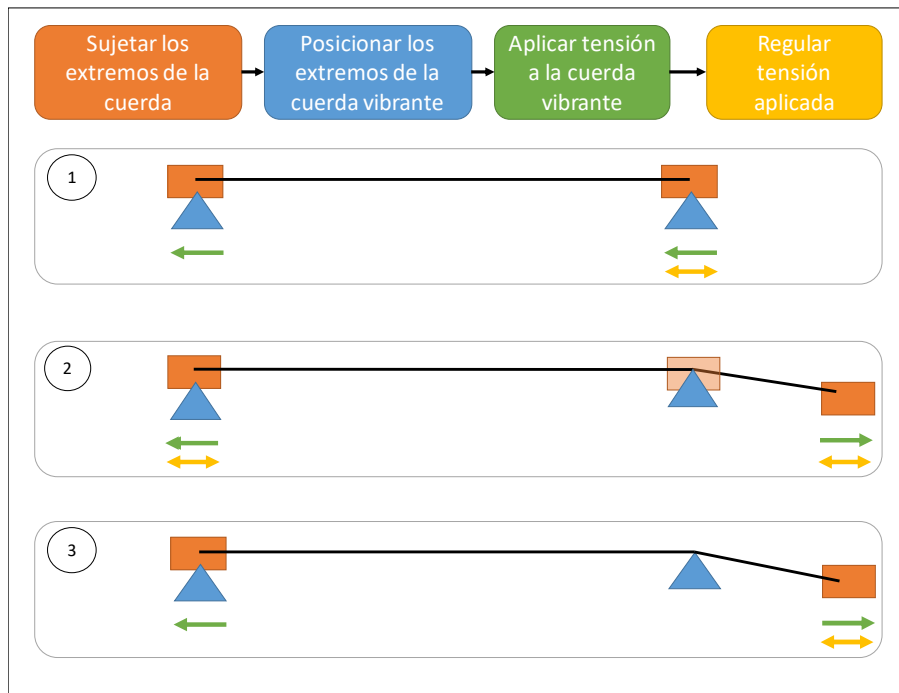


Figura 70 Configuraciones de elementos que interactúan mecánicamente con las cuerdas de guitarra

En un primer acercamiento, la opción 1 es la que parece más conveniente, por no generar ningún cambio de dirección en la cuerda. Sin embargo, el realizar todas las funciones en solo dos interacciones con la cuerda en una configuración no *headless*, generaría un nuevo tipo de clavijero, diferente al tradicional. Debido a la disponibilidad de componentes, la opción 1 será considerada como una igual a la configuración *headless*.

En cuanto a la opción 2, el uso de dos reguladores y una sujeción intermedia implica que uno de los reguladores solo se utilice una vez, pues al sujetar la cuerda en la cejuela, toda la regulación de tensión es realizada por el otro, esto puede resultar poco práctico, por lo que esta opción fue descartada.

Finalmente, la opción 3 es la única que cuenta con un cambio de dirección de la cuerda que puede perjudicar la afinación –nótese que el cambio de dirección de la opción 2 se anula al activar la sujeción intermedia-. A pesar de esto, esta opción es la más sencilla, pues separar

la función de posicionamiento de la regulación de tensión facilita el diseño de cada elemento.

Las opciones 1 y 2 fueron evaluadas considerando su desempeño respecto a las especificaciones de diseño propuestas. En la Tabla 5 se observa la evaluación de dos configuraciones de clavijero distintas: *headless* y tradicional. Como puede observarse, la puntuación de la configuración *headless* fue mayor pero, considerando que el mercado objetivo del diseño prefiere la configuración tradicional, se decidió utilizar ésta.

Tabla 5. Evaluación de configuraciones de clavijero

Especificaciones	Valor normalizado	Configuración de clavijero	
		<i>Headless</i> (Opción 1)	Tradicional (Opción 3)
Masa [kg]	0.62	3	1
Tiempo de ajuste [min]	0.59	2	3
Goniometría [°]	0.50	3	2
Tiempo de manufactura [h]	1.00	2	3
	Total	6.55	6.39

Se evaluó el desempeño de cada configuración en cuatro de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17. Diseño a nivel sistema

17.1 Selección de elementos del sistema de afinación

La Tabla 6 muestra la comparación de tres disposiciones de clavijas comúnmente usadas en la configuración tradicional. Se decidió utilizar 6 clavijas en hilera, que fue la opción con mayor puntaje.

Tabla 6. Evaluación de disposiciones de clavijas

Especificaciones	Valor normalizado	Disposición de las clavijas		
		3 y 3	6 en hilera	4 y 2
Factor de seguridad [adim.]	0.45	3	2	3
Costo [\$]	0.62	2	3	1
	Total	2.59	2.76	1.97

Se evaluó el desempeño de cada configuración en dos de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17.2 Selección de elementos del sistema de mástil

En la Tabla 7 se muestra la evaluación de tres tipos de construcción de mástiles de guitarra, la opción seleccionada fue la de múltiples piezas de madera unidas longitudinalmente. Por otro lado, en la Tabla 8 se observa la comparación entre tres tipos de unión entre mástil-cuerpo, además de la construcción *neck through*. Se optó por usar un mástil atornillado, con un rebaje tipo *All Access*. En ambos casos, la opción seleccionada fue la que obtuvo la mayor puntuación.

Tabla 7. Evaluación de tipos de construcción de mástil

Especificaciones	Valor normalizado	Construcción del mástil		
		Una pieza	Múltiples piezas, unión longitudinal	Múltiples piezas, unión angular
Factor de seguridad [adim.]	0.45	1	3	2
Estética	0.68	2	3	1
Costo [\$]	0.62	1	2	3
Tiempo de manufactura [h]	1.00	1	2	3
	Total	3.42	6.62	6.43

Se evaluó el desempeño de cada configuración en cuatro de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

Tabla 8. Evaluación de tipos de uniones mástil - cuerpo

Especificaciones	Valor normalizado	Unión mástil - cuerpo			
		<i>Bolt-on simple</i>	<i>Bolt-on all access</i>	<i>Set neck</i>	<i>Neck through</i>
Goniometría [°]	0.50	1	3	2	3
Estética	0.68	1	2	2	3
Costo [\$]	0.62	3	2	1	1
Tiempo de manufactura [h]	1.00	3	2	2	1
	Total	6.03	6.09	4.97	5.15

Se evaluó el desempeño de cada configuración en cuatro de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17.3 Selección de elementos del sistema de entonación

Se consideraron los distintos tipos de puente y tira cuerdas revisados en secciones previas y se decidió utilizar un puente flotante de resortes traseros, pues estos permiten al usuario personalizar el instrumento, además de que pueden ser compatibles con el dispositivo Tremol-no. En la Tabla 9

se muestra la evaluación de tres tipos comerciales de puente flotante de resortes traseros. Se decidió utilizar el puente tipo Trémolo de 2 tornillos.

Tabla 9. Evaluación de puentes flotantes

Especificaciones	Valor normalizado	Tipo de puente		
		Trémolo de 2 tornillos	Floyd Rose	Vega Trem
Masa [kg]	0.62	3	2	3
Tiempo de ajuste [min]	0.59	3	1	3
Costo [\$]	0.62	3	2	1
Tiempo de manufactura [h]	1.00	2	1	2
	Total	7.49	4.07	6.25

Se evaluó el desempeño de cada configuración en cuatro de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17.4 Selección de elementos del sistema de cuerpo

El cuerpo de la guitarra eléctrica a diseñar requiere espacios vacíos considerablemente grandes en su sección central. Por un lado, en el frente de la guitarra, es necesario proveer espacio para diferentes tipos de pastillas y componentes electrónicos- Por otro lado, en la cada posterior deben colocarse los resortes del puente flotante. Debido a esto, se propuso utilizar un chasis de aluminio en el cuerpo. Dos configuraciones diferentes de cuerpo de guitarra con construcción aluminio madera fueron evaluados como se muestra en la Tabla 10. Se decidió usar un chasis de aluminio entre dos bloques de madera ya que obtuvo la mayor puntuación.

Tabla 10. Evaluación de configuraciones de cuerpo

Especificaciones	Valor normalizado	Configuración de cuerpo	
		Chasis de aluminio entre dos bloques de madera	Chasis de aluminio entre dos láminas delgadas de madera
Masa [kg]	0.62	2	3
Estética	0.68	2	3
Costo [\$]	0.62	3	2
Tiempo de manufactura [h]	1.00	3	2
	Total	7.45	7.13

Se evaluó el desempeño de cada configuración en cuatro de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17.5 Selección de elementos del sistema eléctrico - electrónico

Con el objetivo de facilitar el intercambio de componentes electrónicos y personalización, se generaron tres propuestas distintas, las cuales fueron comparadas como se observa en la Tabla 11. Se decidió montar toda la electrónica en una placa intercambiable (comúnmente llamada golpeador o *pickguard*), esta opción obtuvo el mayor puntaje.

Tabla 11. Evaluación de métodos de cambio de componentes electrónicos

Especificaciones	Valor normalizado	Método de cambio de componentes electrónicos		
		Inserción de pastillas por la cara trasera del cuerpo	Montar toda la electrónica en un golpeador intercambiable	Dividir la guitarra para manipular el sistema electrónico
Masa [kg]	0.62	2	3	3
Tiempo de ajuste [min]	0.59	2	3	1
Goniometría [°]	0.50	3	2	2
Estética	0.68	3	3	1
Costo [\$]	0.62	1	2	3
Tiempo de manufactura [h]	1.00	2	3	3
	Total	6.57	7.90	5.99

Se evaluó el desempeño de cada configuración en seis de las especificaciones de diseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

17.6 Verificación de compatibilidad

En la Tabla 12 se muestran los resultados de la evaluación por matrices individuales por sistema.

Tabla 12. Elementos seleccionados para los sistemas

Evaluación	Resultado
Configuración de clavijero	Tradicional
Disposición de clavijas	6 en línea
Construcción del mástil	Múltiples piezas, unión longitudinal
Unión mástil-cuerpo	<i>Bolt-on all Access</i>
Tipo de puente	Trémolo de 2 tornillos
Configuración de cuerpo	Chasis de aluminio entre dos bloques de madera
Método de cambio de componentes electrónicos	Montar toda la electrónica en un golpeador intercambiable

El concepto seleccionado involucra la sujeción de cuerdas mediante presión de elementos en un extremo y método cilindro-barrera en el otro. Tomando en cuenta que el concepto seleccionado solo considera un elemento regulador de tensión (clavija) por cuerda, se decidió realizar la sujeción por presión de elementos utilizando clavijas tipo *locking tuner* (Fig. 71), las cuales se pueden disponer en línea recta. Para el otro extremo de la cuerda, el método cilindro barrera es el mismo que utilizan los puentes tipo trémolo de 2 tornillos.

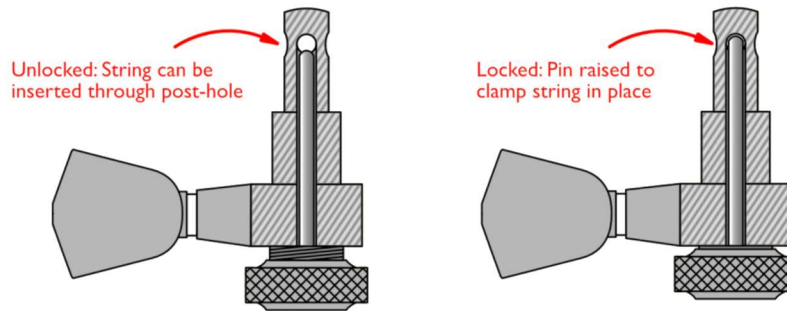


Figura 71 Diagrama de funcionamiento de una clavija tipo locking tuner

La construcción del mástil y su unión con el cuerpo son compatibles con el tipo de cuerpo elegido, ya que éste debe contar con una saliente a la cual atornillar el mástil. Cabe mencionar que hubo dos opciones de construcción de cuerpo con puntajes muy similares, por lo que la elección dependerá del material y proceso de manufactura que se seleccione.

En cuanto a la compatibilidad entre la configuración del cuerpo y el golpeador intercambiable, esta depende de la geometría del cuerpo.

18. Geometría preliminar

Tomando en cuenta la configuración propuesta, se realizaron los bocetos mostrados en la Fig. 72 y se realizó una encuesta con usuarios para identificar cuál tendría una mejor aceptación. Los usuarios más centrados en la ejecución de cumbia mostraron entusiasmo por la opción 2 y algo de simpatía por la opción 3. Por otro lado, los músicos de jazz prefirieron la opción 3 y mostraron rechazo por la opción 2. Ambos grupos tuvieron una respuesta ambigua respecto a la opción 1. La geometría elegida fue la número 3.

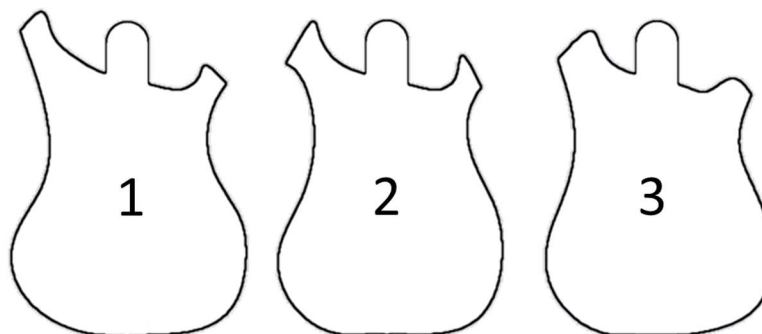


Figura 72 Geometrías propuestas

Para minimizar la cantidad de material necesaria para manufacturar el cuerpo de la guitarra, se propuso generar las dos piezas de madera a partir de un solo tablón. Como se muestra en la Fig. 73, esta propuesta permite utilizar un bloque de madera 38% menor que el requerido para fabricar el cuerpo de una Fender Stratocaster.

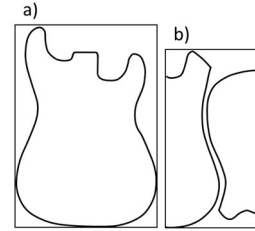


Figura 73 Comparación de área de material necesaria para cortar el cuerpo de a) Fender Stratocaster y b) Diseño propuesto

19. Selección de materiales

Desgraciadamente, varias de las especies de árboles de las que se obtiene la madera en cuestión se encuentran amenazadas. Se han realizado estudios (Ahvenainen, 2018) para determinar cuáles son las propiedades físicas que hacen que ciertas maderas sean adecuadas para una guitarra eléctrica y seleccionar aquellas que doten al instrumento de buenas prestaciones sonoras con un impacto ambiental menor.

No se debe olvidar que, si bien en el sistema eléctrico electrónico tiene una gran influencia en el sonido de una guitarra eléctrica, la señal proviene de la vibración de las cuerdas (Ahvenainen, 2018). La frecuencia natural de un elemento deformable es directamente proporcional a su módulo de Young e inversamente proporcional a su masa (Rao, 2012). Debido a que la masa del instrumento depende tanto del material como de la geometría, y a que se ha encontrado una fuerte relación entre la densidad de la madera y su dureza Janka (Ahvenainen, 2018), las propiedades físicas más importantes para seleccionar la madera de una guitarra son su densidad y módulo de Young.

Hay tres elementos de la guitarra eléctrica que suelen fabricarse con madera: cuerpo, mástil y diapasón. Comúnmente se utilizan maderas diferentes para cada uno de estos elementos, de manera que las maderas de baja densidad se utilizan en el cuerpo de la guitarra, las de media densidad, en el cuerpo o en el mástil y la madera de alta densidad sólo se utiliza en el diapasón.

La lista de maderas recomendadas por (Ahvenainen, 2018) fue evaluada, considerando su disponibilidad y precio en México. Esto llevó a la selección de madera de maple para el mástil y de álamo para el cuerpo de la guitarra.

Para el diapasón, se decidió utilizar Richlite y, para los trastes, acero inoxidable. La aleación de aluminio seleccionada para el chasis fue 7071.

20. Simulación de esfuerzos

Se realizaron análisis de elemento finito -FEA, por sus siglas en inglés- para asegurar que el chasis del instrumento no presente deformaciones plásticas al soportar las cargas aplicadas. Como se muestra en la Figura 74, se consideró una restricción fija en el tornillo del botón para la correa y se aplicaron cargas en los soportes para el puente y sus resortes. La carga

considerada fue de 151 [lb], pues es la tensión máxima para sets de 6 cuerdas reportada por la marca Elixir (Elixir Strings, s.f.).



Figura 74 Cargas y restricciones de movimiento consideradas en la simulación

Como se observa en la Figura 75, si el espesor del chasis es de 1/8", los mayores esfuerzos se presentan en la cavidad del puente. El factor de seguridad mínimo reportado fue de 1.02, lo que indica que el chasis podría soportar las cargas sin presentar deformaciones permanentes. Sin embargo, como no se tomaron en cuenta las cargas aplicadas por el usuario ni el propio peso de la guitarra, este espesor fue descartado. Una nueva simulación fue realizada considerando un espesor de 3/8". En esta iteración, el factor de seguridad mínimo fue de 1.28 y se presentó en los tornillos que unen el chasis con el brazo. Se decidió utilizar un chasis de aluminio 7071 con espesor de 3/8".

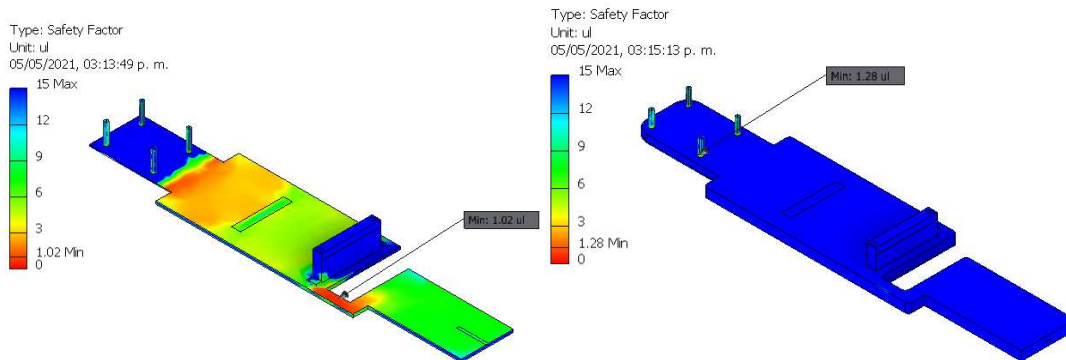


Figura 75 Resultados de los análisis de elemento finito

21. Primer diseño propuesto

En la Figura 76 se muestra el diseño propuesto. Este diseño fue presentado en el congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM) de 2021 y se publicó un artículo al respecto (Waage Delgadillo, y otros, 2021).



Figura 76 Primer diseño propuesto

22. Evaluación del primer diseño

Este diseño combina en un solo instrumento características que usualmente requieren de varios. Sus materiales lo hacen ser estable y duradero. Su geometría y configuración hacen que sea fácilmente personalizable para adecuarse a las necesidades de un guitarrista de rock, jazz y cumbia. El cuerpo puede manufacturarse con un bloque de madera 38% menor que el necesario para hacer una Fender Stratocaster, y el uso de Richlite en el diapasón reduce un 25% el volumen de madera en el mástil. Sin embargo, tiene ciertas desventajas. A continuación se enlistan algunas, que se tendrán en cuenta en futuros diseños.

- Montar toda la electrónica en el *pickguard* puede resultar muy práctico para un técnico que le dé mantenimiento a la guitarra o le realice cuidadosamente alguna modificación al sistema, pero para un músico promedio, tener *pickguards* separados de la guitarra con componentes electrónicos expuestos puede generar inconvenientes.
- Posiblemente la sensación al tacto experimentada por el usuario al tocar en los trastes más altos (a partir del 15) sea extraña, debido a la textura y temperatura del aluminio.
- Aprovechar la geometría cóncava-convexa del cuerpo para generar ambas partes a partir de un solo bloque de madera puede reducir la cantidad de material necesario. Sin embargo, también puede aumentar el tiempo de manufactura, se recomienda realizar simulaciones de manufactura y prototipos para analizar la conveniencia de esta propuesta.
- Los usuarios mostraron interés por remover la lámina trapezoidal colocada detrás del puente -esta lámina sólo está ahí para cubrir el chasis de aluminio-, pero al remover la lámina y mostrarles el ensamble mostraron un mayor rechazo, pues habría un desnivel entre la madera y el aluminio.
- Los usuarios mostraron interés en que la guitarra contara con 24 trastes, no solo 22.

23. Etapa de rediseño

La retroalimentación obtenida sobre el primer diseño propuesto llevó al rediseño del instrumento. En esta ocasión, se hizo énfasis en el diseño del cuerpo y el sistema de intercambio de componentes electrónicos. El mercado objetivo fue el mismo que en la primera iteración.

24. Lista de requerimientos de rediseño

En la tabla 13 se presentan todos los requerimientos considerados en el rediseño. Se utilizó la misma clasificación de requerimientos que en la primera iteración, esto es, fueron separados en básicos (B), de rendimiento técnico (RT) y de entusiasmo (E). Las características de entusiasmo consideradas fueron el intercambio de componentes electrónicos, así como la compatibilidad con una gran variedad de éstos.

Tabla 13. Requerimientos del rediseño

#	Tipo	Requerimientos	Importancia en la primera iteración	Importancia asignada
1	B	La guitarra debe ser capaz de soportar la tensión de las cuerdas.	-	5
2	B	La guitarra debe poder utilizarse con correa.	4.41	4.41
3	B	El cuerpo de la guitarra debe ser cómodo.	-	4.80
4	B	La guitarra debe ser ligera.	3.33	3.33
5	B	La conexión del cable de salida de la guitarra no debe forzar el cable ni interferir con la posición del usuario.	4	4
6	B	Los controles deben contar con una configuración ergonómica.	4.25	4.25
7	B	La guitarra debe ser compatible con pastillas de tamaño estándar.	-	5
8	B	Cada pastilla debe colocarse a una posición específica relativa a la cuerda	-	3
9	B	El sistema electrónico debe tener una conexión a tierra.	-	5
10	B	El sistema electrónico debe estar protegido para evitar manipulación accidental.	-	3
11	RT	El sistema electrónico debe estar aislado para evitar ruido en la señal.	-	3
12	RT	La distancia entre las pastillas y las cuerdas debe poder ajustarse.	-	2
13	RT	La guitarra debe ser de fácil mantenimiento	4	4
14	RT	La guitarra debe ser fácil de transportar.	3.66	3.66
15	E	La guitarra debe ser compatible con pastillas activas.	-	3
16	E	Los componentes electrónicos deben poder intercambiarse sin necesidad de remover las cuerdas de la guitarra.	-	5

Los requerimientos fueron clasificados de acuerdo en 4 tipos: Básicos (B), de rendimiento técnico (RT), de atracción (A) y de entusiasmo (E). Varios requerimientos utilizados en la primera iteración se retomaron.

25. Especificaciones de rediseño

A continuación se enlistan las especificaciones consideradas en el rediseño.

-
- Volumen de madera necesario [cm³]
Volumen de madera requerido para manufacturar el cuerpo de guitarra.
 - Aprovechamiento de material [%]
Porcentaje utilizado del material requerido.
 - Número de piezas de madera
Número de piezas de madera totales en el cuerpo de la guitarra.
 - Número de materiales base
Número de piezas de material necesarias para fabricar la guitarra.
 - Número de procesos
Número de procesos de manufactura necesarios para fabricar la guitarra.
 - Número de componentes
Número de elementos presentes en el instrumento.
 - Masa [kg]
Masa total de la guitarra.
 - Factor de seguridad [adim.]
Factor de seguridad que garantice que los esfuerzos aplicados no generen deformaciones permanentes en el cuerpo del instrumento.
 - Tiempo de manufactura [h]
Tiempo de manufactura del cuerpo y mástil de la guitarra.
 - Costo [\$]
Costo de los materiales, componentes y manufactura de la guitarra.
-

26. Matriz QFD del rediseño

Para analizar a detalle la relación entre los requerimientos y las especificaciones del rediseño, se realizó una matriz QFD (Tabla 14), en la que \ominus , \circ y \blacktriangle son los símbolos para señalar las relaciones fuertes, moderadas o débiles, respectivamente.

Tabla 14. Matriz QFD

			Columna #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			Dirección de mejoramiento: Minimizar (▼), Maximizar (▲), o Objetivo (x)	▼	▲	▼	▼	▼	▼	▼	▲	▼	▼
Fila #	Importancia relativa	Importancia	Calidad demandada (requerimientos de usuario)	Características de calidad (requerimientos funcionales)									
				Volumen de material necesario [cm ³]	Aprovechamiento de material [%]	Número de piezas de madera	Número de materiales base	Número de procesos	Número de componentes	Masa [kg]	Factor de seguridad [adim.]	Tiempo de manufactura [h]	Costo [\$]
1	8.7	5.0	La guitarra debe ser capaz de soportar la tensión de las cuerdas.								▲	⊙	▲
2	7.8	4.5	La guitarra debe poder utilizarse con correa.	⊙	⊙	⊙					▲	⊙	▲
3	8.3	4.8	El cuerpo de la guitarra debe ser cómodo.	⊙	⊙		⊙	⊙	▲	⊙	⊙	⊙	⊙
4	5.8	3.3	La guitarra debe ser ligera.	⊙	⊙		▲				⊙	⊙	⊙
5	7.0	4.0	La conexión del cable de salida no debe forzar el cable ni interferir con la posición del usuario.					▲	▲	⊙			
6	7.4	4.3	Los controles deben contar con una configuración ergonómica.	⊙	⊙	⊙	⊙		⊙		▲		
7	8.7	5.0	La guitarra debe ser compatible con pastillas de tamaño estándar.		▲						⊙		▲
8	5.2	3.0	Cada pastilla debe colocarse a una posición específica relativa a la cuerda.	▲	▲		⊙	▲			▲	⊙	
9	8.7	5.0	El sistema electrónico debe tener una conexión a tierra.				⊙	▲	▲	▲		▲	
10	5.2	3.0	El sistema electrónico debe estar protegido para evitar manipulación accidental.	▲	▲		⊙	⊙	⊙			▲	
11	5.2	3.0	El sistema electrónico debe estar aislado para evitar ruido en la señal.				⊙	⊙	▲			⊙	⊙
12	3.5	2.0	La distancia entre las pastillas y las cuerdas debe poder ajustarse.					▲			▲	▲	
13	7.0	4.0	La guitarra debe ser de fácil mantenimiento.						⊙	▲			▲
14	6.4	3.7	La guitarra debe ser fácil de transportar.	⊙	⊙				⊙	⊙			
15	5.2	3.0	La guitarra debe ser compatible con pastillas activas.	▲	▲		⊙	⊙	⊙	⊙	▲	▲	⊙
16	8.7	5.0	Los componentes electrónicos deben poder intercambiarse sin necesidad de remover las cuerdas de la guitarra.	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		▲	⊙	⊙
Importancia relativa				785	955	371	921	767	827	780	818	399	681

Tabla 15. Objetivos e importancia de los requerimientos de rediseño

	Requerimiento	Especificaciones relacionadas	Objetivo	Importancia relativa	Importancia normalizada
A	▼ Volumen de material necesario [cm ³]	2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 15, 16	Indefinido (depende de los materiales)	245.2	0.82
B	▲ Aprovechamiento de material [%]	2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 14, 15, 16	>70%	298.3	1.00
C	▼ Número de piezas de madera	2, 6, 16	<3	116.1	0.39
D	▼ Número de materiales base	3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 15, 16	±25%	287.6	0.96
E	▼ Número de procesos	3, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	< 4	239.6	0.80
F	▼ Número de componentes	3, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16	Indefinido (depende de la configuración)	258.3	0.87
G	▼ Masa [kg]	1, 2, 3, 4, 5, 9, 13, 14, 15	<3	243.8	0.82
H	▲ Factor de seguridad [adim.]	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 12, 15, 16	>1.2	255.6	0.86
I	▼ Tiempo de manufactura [h]	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	Indefinido (depende de la configuración)	124.7	0.42
J	▼ Costo [\$]	3, 7, 11, 13, 15, 16	<\$15000	212.6	0.71

La importancia relativa se normalizó a partir del valor mayor (298.3)

27. Estructura funcional del cuerpo de la guitarra

Como se observa en la Figura 77, en esta iteración se analizaron las funciones del cuerpo de la guitarra eléctrica. Para esto, el cuerpo se dividió en tres secciones. Se identificó que la sección A es la que tiene el mayor nivel de interacción con el usuario porque cuando éste toca música con el instrumento –tanto cuando está sentado como cuando está de pie– empuja ligeramente la guitarra contra su cuerpo. Además, esta sección provee una superficie sobre la que el usuario desliza su brazo. Por otro lado, la sección B es la que une

el cuerpo con el brazo y el puente, por lo que debe tener una elevada resistencia mecánica. Finalmente, la sección C actúa como una interfaz entre las piernas del guitarrista y el instrumento. El sistema electrónico está ubicado en las porciones B y C; B para las pastillas y C para los controles y componentes adicionales.

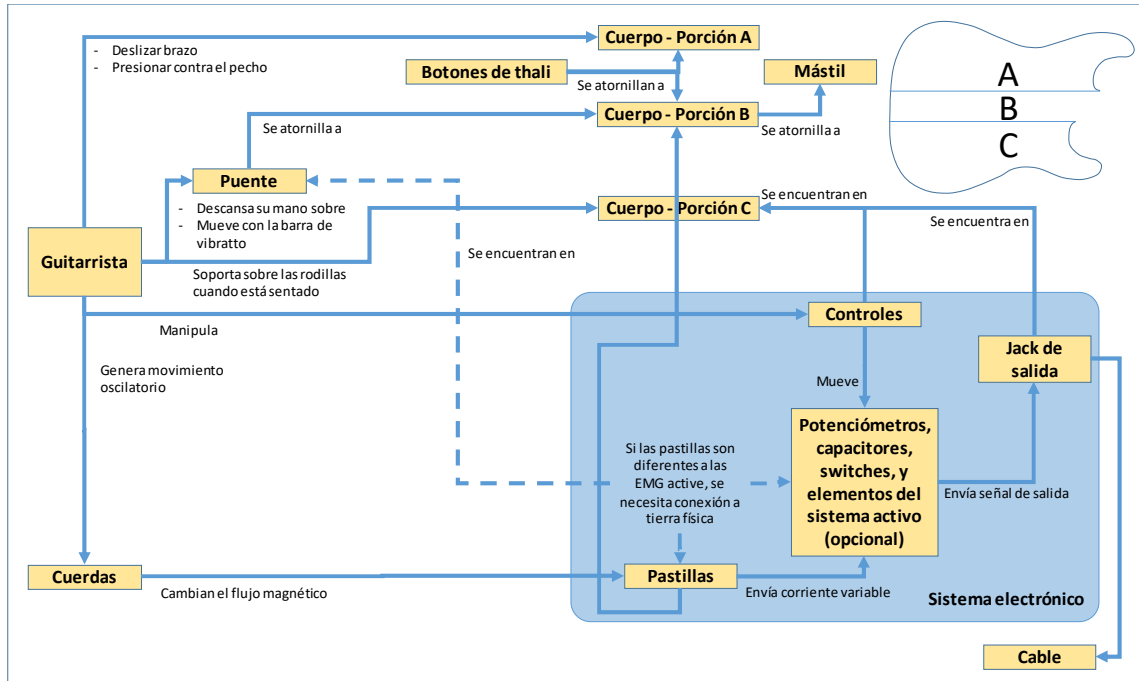


Figura 77 Estructura funcional del cuerpo de la guitarra eléctrica

28. Concepto y configuración

En esta iteración, el concepto de diseño utilizó nuevamente la sujeción de cuerdas mediante presión de elementos y método cilindro-barrera, los trastes incrustados en el diapasón y la transducción mediante pastillas electromagnéticas. Sin embargo, también se analizaron conceptos para intercambiar componentes electrónicos. Las propuestas fueron las siguientes:

- Cambio individual de pastillas con controles estáticos.
- Cambio de sets de pastillas con controles estáticos.
- Cambio del circuito completo.

Considerando que hay configuraciones de controles que los usuarios asocian inmediatamente con configuraciones de pastillas específicas, además de que hay componentes que sólo operan adecuadamente con tipos específicos de pastillas, el concepto elegido fue el cambio de circuito completo. Se decidió montar toda la electrónica en una unidad de almacenamiento removible. Debido a que el sistema electrónico no interfiere con la porción A del cuerpo y los resortes traseros del puente interfieren con el

paso de las pastillas por la parte trasera de la guitarra, se decidió usar una configuración de movimiento lateral para la remoción e instalación de esta unidad. Se diseñó un cuerpo compatible tanto con puentes tipo trémolo tradicional como con *headless*.

29. Rediseño de sistemas

29.1 Sistema de cuerpo

Para diseñar el cuerpo se retomó la división de tres porciones propuesta en el diagrama funcional del cuerpo (Fig. 76). En la Tabla 16 se muestra la evaluación de 3 configuraciones de cuerpo distintas. Se decidió utilizar materiales diferentes para las porciones A, B y C.

Tabla 16. Evaluación de configuraciones de cuerpo

Especificaciones	Valor normalizado	Configuración de cuerpo		
		Cuerpo completo de una pieza	Porciones A y B generadas a partir de una sola pieza. Porción C como un elemento adicional.	Porciones A, B y C generadas de forma independiente (materiales diferentes).
Volumen de material necesario [cm ³]	0.82	1	2	3
Aprovechamiento de material [%]	1.00	1	2	3
Número de piezas de madera	0.39	3	2	2
Número de materiales base	0.96	3	2	1
Número de procesos	0.80	3	2	2
Masa [kg]	0.82	3	2	2
Factor de seguridad [adim.]	0.86	1	2	3
Tiempo de manufactura [h]	0.42	2	3	1
Costo [\$]	0.71	2	3	2
	Total	13.86	14.7	14.87

Se evaluó el desempeño de cada configuración en nueve de las especificaciones de rediseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

29.2 Sistema eléctrico-electrónico

Se propuso contener el sistema eléctrico-electrónico en una caja metálica. De esta forma se crea una jaula de Faraday que reduce la sensibilidad de la guitarra a ruido electromagnético del ambiente (Sweetwater, 1999). En la Tabla 17 se muestra la evaluación de tres propuestas para generar esta caja metálica. Se decidió utilizar una caja de lámina cuya tapa sea el propio *pickguard*.

Tabla 17. Evaluación de dispositivos de almacenamiento

Especificaciones	Valor normalizado	Almacenamiento del sistema eléctrico-electrónico		
		Bloque metálico con una cavidad maquinada y <i>pickguard</i>	Dos C's de lámina metálica encontradas.	Caja de lámina metálica doblada y <i>pickguard</i>
Aprovechamiento de material [%]	1.00	1	3	3
Número de procesos	0.80	3	2	3
Número de componentes	0.87	3	3	2
Masa [kg]	0.82	1	3	3
Tiempo de manufactura [h]	0.42	1	3	2
Costo [\$]	0.71	1	2	3
	Total	7.96	12.34	12.57

Se evaluó el desempeño de cada configuración en seis de las especificaciones de rediseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

El mecanismo para sujetar la caja metálica debe poder ser operado por el usuario manualmente. Se generaron cuatro propuestas distintas para unir los elementos, las cuales fueron comparadas. Como se observa en la Tabla 18, el uso de imanes para unir los elementos fue la opción que obtuvo la mayor puntuación.

Tabla 18. Evaluación de mecanismos de sujeción

Especificaciones	Valor normalizado	Mecanismo de sujeción			
		Corredera con muescas	Tornillo	Perno expansivo	Imanes
Número de materiales base	0.96	3	2	2	1
Número de procesos	0.80	1	2	2	3

Número de componentes	0.87	2	2	2	3
Tiempo de manufactura [h]	0.42	2	3	3	3
	Total	6.26	6.52	6.52	7.23

Se evaluó el desempeño de cada mecanismo en cuatro de las especificaciones de rediseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

30. Selección de materiales y realización de simulaciones

Se decidió utilizar madera de álamo en la porción A del cuerpo de la guitarra. Para las porciones B y C se optó por usar aluminio, para proveer resistencia mecánica y estabilidad dimensional a la porción B y crear la jaula de Faraday de la porción C.

En esta iteración se simplificó el diseño del chasis de aluminio y se realizaron análisis de elemento finito (FEA) utilizando el nuevo modelo. Como se muestra en la Fig. 78, las restricciones de movimiento se colocaron en los tornillos que unen el cuerpo con el mástil y la carga (671.68 [N]) fue aplicada en un soporte para el puente. Se hicieron cuatro simulaciones considerando distintos espesores para el chasis. Los resultados de estos análisis se encuentran en la Tabla 19. Se decidió utilizar una placa de aluminio de 3/8 [in] debido a que este espesor presentó esfuerzos que la mayoría de las aleaciones de aluminio pueden soportar.

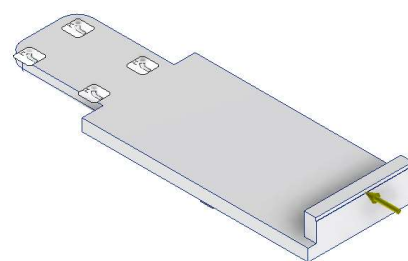


Figura 78 Cargas y restricciones de movimiento consideradas en la simulación

Tabla 19. Resultados de simulaciones

Espesor del chasis [in]	1/2	3/8	0.3	0.134
Esfuerzo máximo [MPa]	23.05	38.87	75.88	444.1
Masa [kg]	0.735	0.57	0.472	0.253

Como puede observarse en la Tabla 20, se evaluaron dos aleaciones distintas de aluminio: 3003 (Al – Mn) y 6061 (Al – Mg – Si). El aluminio 6061 es 8% más caro que el 3003, pero tiene una mejor maquinabilidad, por lo que disminuye el tiempo de manufactura. El aluminio 3003 fue el material seleccionado para el chasis. En la Figura 78 se muestra el ensamble del chasis, puente y dispositivo de fijación de puente.

Tabla 20. Evaluación de aleaciones de aluminio

Especificaciones	Valor normalizado	Configuración de cuerpo		
		6061 Chasis 6061 Soporte de puente	3003 Chasis 3003 Soporte de puente	3003 Chasis 6061 Soporte de puente
Número de materiales base	0.96	3	3	2
Factor de seguridad [adim.]	0.86	3	2	3
Tiempo de manufactura [h]	0.42	3	2	2
Costo [\$]	0.71	1	3	2
	Total	7.43	7.58	6.76

Se evaluó el desempeño de cada aleación en cuatro de las especificaciones de rediseño. Se calificó como 3 = óptimo, 2 = regular, 1 = poco deseable. Las calificaciones de desempeño se multiplicaron por los valores normalizados de importancia y estos productos se sumaron para obtener las puntuaciones totales de cada configuración.

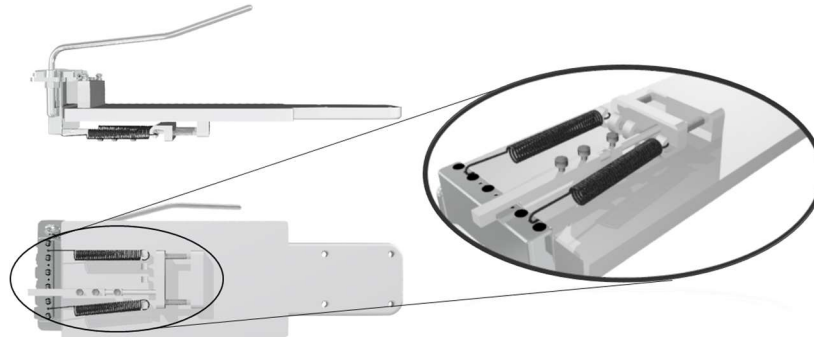


Figura 79 Ensamble de chasis con puente flotante y dispositivo de fijación de puente. Vista lateral e inferior y ampliación del ensamble en vista isométrica.

31. Segundo diseño propuesto

Debido a la configuración de cuerpo seleccionada, en esta iteración se optó por una geometría en la que la porción C fuera considerablemente más pequeña que la A. Tomando en cuenta que el grupo de usuarios pertenecientes al mercado objetivo mostró interés por el cuerpo tipo Boden, se generó un diseño similar a éste. El diseño propuesto se muestra en la Figura 79. Este diseño fue presentado en la Conferencia de la Sociedad de Ingeniería Industrial y Administración de Operaciones (IEOM, por sus siglas en inglés) y se publicará un artículo al respecto (IEOM Society International, 2022).

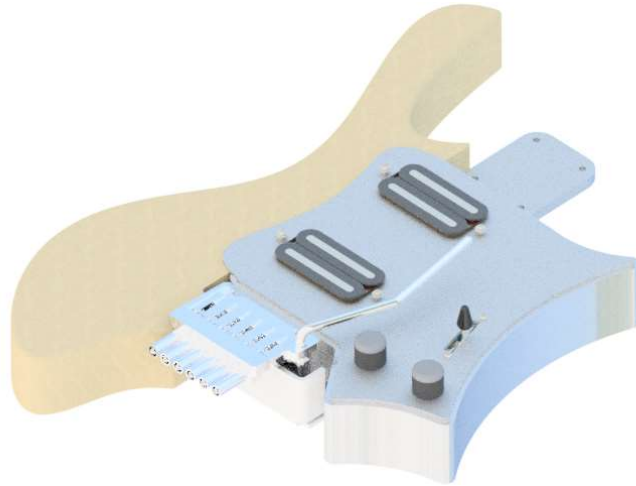


Figura 80 Segundo diseño de cuerpo propuesto

32. Evaluación del segundo diseño

Esta iteración también combina el intercambio de componentes electrónicos con un puente flotante compatible con el Tremol-no. El cuerpo diseñado es compatible con la configuración de clavijero tradicional como con la *headless*. Este diseño reduce aún más el uso de madera, pues se necesita un bloque de madera 55% menor al requerido para fabricar una Fender Stratocaster. Además, esta propuesta provee un espacio vacío considerable para poder colocar una gran variedad de componentes electrónicos. El dispositivo de almacenamiento del sistema eléctrico-electrónico genera una jaula de Faraday y permite colocar hasta 4 pastillas *humbucker* de tamaño estándar, así como múltiples potenciómetros y switches, además de pilas o sistemas activos. A pesar de esto, esta iteración también tiene varias desventajas, algunas de las cuales son:

- Aún no es posible decir si el dispositivo de almacenamiento propuesto es compatible con pastillas *sustainer*. Aunque han existido guitarras que tienen tanto aluminio que las corrientes eléctricas circulantes son disipadas antes de que lleguen al driver de *sustainer*, el uso de metales no magnéticos cerca de las pastillas no es recomendable en guitarras con *Sustainiac* (Sustainiac, 2018). Se requiere realizar prototipos físicos para determinar esta compatibilidad.

- El funcionamiento de la unión por imanes ha sido demostrado prácticamente por Relish guitars, pero su implementación puede requerir la generación de modelos o prototipos para determinar la posición, tipo y tamaño de los imanes requeridos.

33. Conclusiones

Se identificó que los guitarristas que tocan múltiples estilos musicales suelen necesitar instrumentos con puente fijo y puente flotante, además de utilizar distintos componentes electrónicos. Se generaron dos diseños que proveen todas estas características, así como de una geometría que resultara atractiva para el mercado objetivo.

Las geometrías propuestas permiten que el usuario toque los trastes más altos (hasta el 22). Esto, aunado con las curvas añadidas al cuerpo del segundo diseño propuesto y su compatibilidad con la configuración *headless*, supone la integración de elementos de ergonomía al diseño.

Los materiales elegidos fueron Richlite, madera de álamo y aluminio 3003, estos materiales permiten ofrecer características de entusiasmo que incentivan el uso intenso del instrumento para los músicos del mercado objetivo. Cabe mencionar que las características de entusiasmo desarrolladas (el puente flotante que se puede fijar y la electrónica intercambiable) pueden no convertir a la guitarra en un instrumento de uso intenso si el usuario no necesita dichas características – por ejemplo, si únicamente toca un estilo musical que no le exige utilizar puente flotante o cambiar su cadena de efectos -; para estos casos, es recomendable analizar a profundidad el producto para determinar cómo intensificar su uso.

El uso de placas de aluminio 3003 fue validado mediante simulaciones computacionales, pues puede resistir la tensión de las cuerdas de guitarra eléctrica sin deformarse plásticamente. Además, seleccionar este material permitió generar un diseño con una manufactura más sencilla que la de guitarras como la EBG Jigsaw o la Relish Jane. Además, se prevé como una solución asequible si se fabrica una serie de 120 guitarras. Sin embargo, al ser relativamente poco utilizada la placa de 3/8 “, fue imposible conseguir un trozo pequeño para realizar un prototipo rápido del chasis. Como trabajo a futuro, en una tercera iteración se considerará el uso de materiales que se puedan obtener en cantidades pequeñas para facilitar la generación de prototipos.

No se puede afirmar de manera cuantitativa que los instrumentos diseñados sean sustentables, pues no se realizaron análisis a profundidad sobre su vida útil y renovación de los recursos utilizados para su manufactura, pero se diseñaron de forma que se utilice poco material en su construcción, sean duraderos y de uso intenso. De esta forma, se logró generar dos diseños diferentes, uno cuya fabricación requiere de un bloque de madera 38% menor que el requerido para fabricar el cuerpo de una Fender Stratocaster y otro con el que se mejoró esta cifra, llegando a un ahorro del 55%.

34. Anexo I: Encuesta

34.1 Sección 1: Preguntas de contexto

1. ¿Cuántos años tienes?
2. ¿Cuál es tu sexo? (Hombre o mujer)
3. ¿Eres zurdo, derecho o ambidiestro?
4. ¿Qué tipo de guitarra utilizas?
 - a. Guitarra para derechos (la mayoría de las guitarras son para derechos)
 - b. Guitarra para zurdos
5. ¿Cuánto tiempo llevas tocando la guitarra? (años)
6. Además de la guitarra, ¿tocas algún otro instrumento?
7. ¿Qué otros instrumentos tocas?
8. ¿Qué estilos musicales tocas? (Puedes seleccionar varios)
 - a. Rock
 - b. Metal
 - c. Pop
 - d. Jazz
 - e. Salsa
 - f. Cumbia
 - g. Otro... (Respuesta abierta)
9. ¿Cuántas guitarras eléctricas tienes actualmente?
 - a. 1
 - b. 2 o 3
 - c. Más de 3
 - d. Actualmente no tengo guitarra eléctrica
10. ¿Cómo conservas tu(s) guitarra(s)? (Puedes seleccionar varias opciones)
 - a. En funda(s)
 - b. En estuche(s) rígido(s)
 - c. En soporte(s) de piso
 - d. En soporte(s) de pared
11. ¿Cuál de los siguientes factores consideras que sea el más importante en una guitarra eléctrica?
 - a. Facilidad de transporte
 - b. Comodidad del mástil
 - c. Facilidad de mantenimiento
 - d. Versatilidad sonora
 - e. Conservación de entonación y afinación
 - f. Atractivo visual

12. Solo fijándote en la apariencia de las siguientes guitarras, ¿cuáles te gustan más?
(Puedes seleccionar varias)



13. El clavijero de una guitarra *headless* se ubica en el cuerpo, ¿esto te gusta o prefieres la ubicación tradicional?



- a. Me gusta más la configuración tradicional
- b. Me gusta más la configuración *headless*
- c. Ambas configuraciones me gustan por igual

14. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada necesario y 4 es muy necesario. Para ti, ¿qué tan necesario es el puente flotante (barra de trémolo/vibrato)?



34.2 Sección 2: Preguntas sobre materiales



1. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada y 4 es mucho. ¿Qué tan dispuesto estarías a comprar una guitarra fabricada con maderas no tradicionales?
2. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada y 4 es mucho. ¿Qué tan dispuesto estarías a comprar una guitarra fabricada completamente con materiales diferentes a la madera?
3. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada y 4 es mucho. ¿Qué tan dispuesto estarías a comprar una guitarra cuyo mástil esté fabricado de un material diferente a la madera?
4. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada y 4 es mucho. ¿Qué tan dispuesto estarías a comprar una guitarra cuyo cuerpo esté fabricado de un material diferente a la madera?
5. En caso de que el cuerpo o mástil, o incluso la guitarra completa no fueran de madera. ¿Te gustaría que visualmente pareciera madera o preferirías que fuera evidente el cambio de material?
 - a. Me gustaría que parezca madera
 - b. Me gustaría que sea evidente el cambio de material
 - c. Me da igual siempre y cuando se vea bien
6. En la siguiente imagen se muestran guitarras con un cuerpo central de madera y piezas adicionales para aumentar la comodidad. En una escala del 1 al 4, donde 1 es nada y 4 es mucho. ¿Qué tan dispuesto estarías a comprar una guitarra con esta característica?





35. Anexo II: Entrevista

1. ¿Cuántos años tienes?
2. ¿Cuánto tiempo llevas tocando la guitarra?
3. ¿Cómo aprendiste a tocar la guitarra?
4. ¿Te dedicas profesionalmente a la música? Si es así, ¿qué tipo de trabajo realizas?
5. ¿Qué estilos musicales tocas?
6. ¿Tocas algún otro instrumento? ¿Cuál?
7. ¿Cuántas guitarras eléctricas tienes actualmente?
8. ¿Comprarías otra guitarra eléctrica?
9. ¿Hay alguna guitarra eléctrica que quieras comprar? ¿Por qué?
10. ¿Prefieres tener una guitarra para cada situación o una que te sirva para todo (Variac, Strandberg, Vox)?
11. ¿Te gustan las guitarras headless? ¿Por qué?
12. Para ti, ¿cuál es el factor más importante en una guitarra?
13. ¿Tienes una guitarra favorita? ¿Cuál es y por qué?
14. Menciona al menos una característica (componente o construcción) que busques en una guitarra.
15. De las guitarras que has tenido, que te gusta y que no te gusta.
16. *Contexto sobre la madera. Tomando en cuenta esto, ¿cuál de las siguientes opciones preferirías?
 - a. Buscar y comprar una guitarra *vieja* que sí sea de las maderas tradicionales.
 - b. Comprar una guitarra nueva fabricada con otras maderas que cuenten con un buen rendimiento.
 - c. Comprar una guitarra de un tipo de material diferente a la madera.

36. Anexo III: Información recabada de las entrevistas

<p>Usuario: José. Hombre, 23 años, estudiante de actuaría – músico amateur</p>	
<p>Contexto: Aprendió a tocar violín, guitarra clásica, guitarra eléctrica y bajo eléctrico, en ese orden. Estudió violín en el conservatorio. Aunque toca regularmente, la música para él es un pasatiempo. Sólo toca en su casa. En la guitarra eléctrica, toca <i>death metal</i> y <i>thrash metal</i>.</p>	
<p>¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)? Quiere comprar una Strandberg Boden 7 (7 cuerdas), por su amplio registro y calidad de construcción. Aunque nunca ha probado una <i>headless</i>, le llaman la atención y le parecen muy atractivas.</p>	<p>Strandberg Boden 7</p> 
<p>Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Comodidad, después de que tenga un buen sonido, claro” • “Que no sea pesada, para poder tocar de pie.” • Facilidad para tocar en los trastes cercanos al cuerpo: “Cuando tocas <i>arriba</i>, llega a ser muy rígido.” 	
<p>¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pocos potenciómetros. • Puente flotante o semi-flotante. • Clavijero 3 y 3. Considera que al contar con 6 afinadores en línea o 4 y 2, estos están <i>muy encimados</i> y no le permiten manipularlos bien. • 24 trastes. • “Siempre y cuando me guste el sonido me da igual si las pastillas son simples o dobles, activas o pasivas. Aunque estéticamente me gustan mucho cómo se ven las pastillas EMG.” 	
<p>¿Qué opina de las guitarras <i>headless</i>? “Me gusta cómo se ven, dotan a la guitarra de un sonido único, algo gangoso”.</p>	
<p>¿Qué guitarra(s) eléctricas tienes? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?</p>	
<p>Dean Vendetta XM Tremolo Le gusta: “Su color (negro mate). Si me compro la Strandberg buscaría que fuera del mismo color o en todo caso, color madera.”</p> <p>No le gusta: “No afina bien, no las cuerdas sino los trastes” (tiene problemas de entonación).</p>	<p>Dean Vendetta XM Tremolo</p> 
<p>¿Qué material prefiere? “Preferiría la madera, porque ayuda mucho a que vibre.”</p>	

<p>Usuario: Gilberto. Hombre, 23 años, estudiante de ingeniería mecánica – músico amateur</p>	
<p>Contexto: Aprendió a tocar la guitarra eléctrica en un taller de la secundaria; años después aprendió a tocar guitarra clásica y estudió formalmente esta última en la escuela nacional de música. En la guitarra eléctrica, toca rock y metal.</p>	
<p>¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?</p>	
<p>“Sí, una <i>headless</i>, puede ser Kiesel o Strandberg.”</p>	
<p>Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ergonomía • Bajo peso • Aspecto visual 	
<p>¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pastillas activas • Barra de whammy (puente flotante) • Cejuela bloqueante • Selector amplio (5 posiciones) • “Que el material del brazo permita desplazar la mano rápidamente” (acabado del mástil) • “Que no indique en el diapasón el número de trastes. Aunque a veces se ven muy bonitos, al tocar la acústica me acostumbré a ubicarme en el diapasón sin utilizar marcadores.” 	
<p>¿Qué opina de las guitarras <i>headless</i>?</p> <p>“Me gustan, he probado algunas por periodos cortos de tiempo y me han parecido muy cómodas.”</p>	
<p>¿Qué guitarra(s) eléctricas tienes? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?</p>	
<p>Le gusta: “Era una guitarra sencilla pero bonita, color madera con golpeador negro”</p> <p>No le gusta: No se mantenía afinada. “Desde entonces no me gusta ese tipo de clavijero (3y3).” “Era una guitarra algo vieja, la electrónica daba muchos problemas.”</p>	<p>Copia de Les Paul Recording</p> 
<p>Le gusta: “Se ve muy bien cuando la toco parado.”</p> <p>No le gusta: “No es cómodo estudiar sentado con ella, por la forma del cuerpo.” “La salida del cable lo fuerza cuando toco sentado. He roto varios cables así.”</p>	<p>Eagle Flying V</p> 

¿Qué material prefiere?

“Estoy abierto a utilizar materiales poco convencionales, pero no me gustaría que fuera evidente el cambio para alguien que me vea tocar.”

Usuario: Adrián. Hombre, 22 años, maestro de música – músico profesional

Contexto: Aprendió a tocar la guitarra eléctrica en un curso. Un tiempo después entró a dar clase en la escuela en la que tomó ese primer curso. Ha tocado una gran variedad de guitarras, aunque no cuenta con muchas. En guitarra eléctrica, toca rock, funk y synth.

¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?

“Las Fender mexicanas son muy buenas, he probado varias y me gustan mucho, pero no tengo ninguna.”

Fender Stratocaster MIM



Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?

“Que sea agradable a la vista, tenga versatilidad y comodidad.”

¿Qué opina de las guitarras *headless*?

Le gustan. “Es algo que no todos tienen. No todos están dispuestos a invertir en una buena guitarra *headless*.”

¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?

- Brazo atornillado.
- Pastillas en configuración H-H o H-S-H

¿Qué guitarra(s) eléctricas tiene? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?

Le gusta:

“Es una guitarra que no tengo pero la he probado y me encanta. Tiene una gran comodidad del brazo, versatilidad y un Floyd Rose con mucha estabilidad”

Music man Majesty



Le gusta:


“El brazo es muy cómodo, aunque las Gibson tienen fama de que son para manos grandes y mis manos son pequeñas, me resulta muy cómoda, puedo sujetarlo por completo. He probado Ibanez, famosas por sus brazos delgados y me parecen muy incómodas, aunque el brazo sea delgado, el diapasón es más ancho y no puedo tocar bien con ellas.”

Gibson Les Paul







No le gusta:

“Es demasiado pesada.”



<p>Le gusta: “Es muy versátil y funciona muy bien para muchos estilos.”</p> <p>No le gusta: “En ciertas ocasiones le falta fuerza, porque son sólo pastillas simples.”</p>	<p>Fender Stratocaster</p> 
<p>¿Qué material prefiere? “La madera, si ya no se fabricaran guitarras de madera, preferiría tener un instrumento de segunda mano a comprar uno que no sea de madera.”</p>	

<p>Usuario: Mauricio. Hombre, 23 años, productor musical – músico profesional</p>	
<p>Contexto: Aprendió a tocar con profesores particulares, posteriormente siguió de forma autodidacta, hasta que entró a la carrera. Estudió producción musical. En guitarra eléctrica, toca todos los estilos que necesite en su trabajo de producción musical.</p>	
<p>¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?</p>	
<p>Quiere comprar una Gretsch Pro Jet. “Me gusta por su calidad y estabilidad, además de que tiene Bigsby y me gustaría tener un puente flotante suave”</p>	<p>Gretsch Pro Jet</p> 
<p>Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica? “Siempre, siempre siempre ha sido la comodidad. Aunque suene increíble, si no es cómoda para mí, no la compro.”</p>	
<p>¿Qué características busca en una guitarra eléctrica? Que tenga buen <i>sustain</i>.</p>	
<p>¿Qué opina de las guitarras <i>headless</i>? No le parecen atractivas visualmente y no le parece cómodo afinar las cuerdas en el cuerpo.</p>	
<p>¿Qué guitarra(s) eléctricas tienes? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?</p>	
<p>Le gusta: Fue mi primera guitarra</p> <p>No le gusta: “No me gusta ni su sonido ni su estética.” “Le cambié la electrónica y las pastillas. Después le hice un <i>relic</i>.” (Lijó la guitarra para remover algo de pintura).</p>	<p>Squier Stratocaster</p> 

<p>Le gusta: “Se veía muy bien”</p> <p>No le gusta: Sonido poco versátil. “Demasiado metalero.” “Era complicado ajustar el puente flotante”</p>	<p>Ibanez RG370DX</p> 
<p>Le gusta “Es la guitarra más cómoda que he tocado. Tiene un brazo delgado pero no tanto como el de una Ibanez –que llegan a ser tan delgados que son incómodos-.”</p> <p>No le gusta: “No es tan versátil (tiene <i>humbuckers</i>)” “Originalmente no tenía selector de pastillas, sino que utilizaba un <i>blender</i> (un potenciómetro rotativo) que regulaba qué tanto sonaba cada una. Esto no me gustó para nada, era muy impráctico. Lo sustituí por un switch.”</p>	<p>Fender Pawn Shop ‘72</p> 
<p>¿Qué material prefiere? “He visto que hay guitarras de acrílico que funcionan bien, así que estoy abierto a probar cualquier material”</p>	

<p>Usuario: XF. Hombre, 23 años, creador de contenido digital y docente – músico profesional</p>	
<p>Contexto: Es baterista, aprendió a tocar la guitarra viendo videos en internet. Da clases de batería. En guitarra eléctrica, toca rock, metal, pop y un poco de blues y salsa.</p>	
<p>¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?</p>	
<p>BC Rich Gunslinger</p> 	<p>Super Strat Jackson</p> 
<p>Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica? “Comodidad y versatilidad en cuanto a sonido”</p>	
<p>¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puente flotante Floyd Rose • Colores llamativos; morado o verde neón • Clavijero al revés 	

<p>¿Qué opina de las guitarras <i>headless</i>?</p> <p>Le gustan, nunca ha probado una, pero le parecen muy atractivas.</p>	
<p>¿Qué guitarra(s) eléctricas tienes? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?</p>	
<p>Le gusta: “Tiene cuerpo de súper Strat.”</p> <p>No le gusta: “Me decepcioné cuando vi que el puente era trémolo y no Floyd Rose.”</p>	<p>Yamaha Gigmaker</p> 
<p>Le gusta: “Está mejor construida y es muy versátil.”</p> <p>No le gusta: “Ni siquiera tiene palanca.”</p>	<p>Epiphone Les Paul 100</p> 
<p>¿Qué material prefiere?</p> <p>Prefiere instrumentos de madera, aunque probaría otros materiales. Nunca compra instrumentos de segunda mano</p>	

<p>Usuario: Eduardo. Hombre, 18 años, guitarrista de medio tiempo – músico profesional</p>	
<p>Contexto: Aprendió a tocar guitarra clásica en una asignatura escolar en la secundaria, un año después, comenzó a tocar guitarra eléctrica. Actualmente toca en una banda. En guitarra eléctrica, toca todos pop, rock, blues y funk.</p>	
<p>¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?</p> <p>“Una Fender Jaguar; me gusta su estética y la versatilidad ofrece su hardware. Tiene una distribución bastante interesante de los tonos y se pueden hacer combinaciones interesantes con las pastillas.”</p> <p>“Una Gretsch tipo Les Paul, que me gusta por su estética y pastillas”</p>	<p>Fender Jaguar</p>  <p>Gretsch Pro Jet</p> 
<p>Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?</p> <p>“Que se adecúe a la estética que me gusta; <i>vintage</i>, colores pastel y que pueda aplicar el sonido de las pastillas en varios contextos, sonidos y texturas.”</p>	
<p>¿Qué opina de las guitarras <i>headless</i>?</p> <p>“Por el estilo que toco, no podría sacarle provecho a ese tipo de estética.”</p>	
<p>¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Que el mástil se vea bien barnizado.” 	

- “Que el plástico de las pastillas y las perillas se vea gastado, como si estuviera viejo.”

¿Qué guitarra(s) eléctricas tiene? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?

Le gusta:

“Es una emulación de la que usaba el creador de la Les Paul. Está curioso el diseño y las pastillas tienen una cobertura negra. Está diseñada para tener el sonido más limpio posible.”

No le gusta:

“El puente se tiene que atornillar muy bien para ajustar la acción de las cuerdas.”

Copia de Les Paul Recording



Le gusta:

“El mástil es delgado, bastante cómodo, casi como el de una Ibanez. Es bastante ligera y fácil de transportar.”

“Las 3 pastillas, en distribución HSS.”

No le gusta:

“Tenía una tapa trasera tapando los resortes del puente flotante. Esa tapa tenía agujeros independientes para cada cuerda y era muy incómodo cambiar las cuerdas, terminé quitando la tapa y ahora la utilizo con los resortes al descubierto.”

Yamaha Pacifica 112



Le gusta:

“La parte trasera del mástil está barnizada y se ve muy bien. Tiene una configuración clásica de 3 single coils con 3 perillas; 2 de tono y una de volumen.”

“Aunque también tiene la tapa trasera, es fácil cambiarle las cuerdas porque tiene una cavidad alargada para meter todas las cuerdas, en lugar de una pequeña para cada una.”

“Los afinadores *vintage* que tiene hacen muy fácil el cambio de cuerdas y evitan que te piques con el extremo de la cuerda.”

Squier Stratocaster



¿Qué material prefiere?

“Me gustaría experimentar con una que no esté hecha de madera. Como Jack White, él usa una guitarra de plástico”.

Usuario: Francisco F. Hombre, 24 años, estudiante de ingeniería – músico profesional

Contexto: Aprendió de forma autodidacta y lleva tocando en una banda aproximadamente 10 años. En guitarra eléctrica, toca rock, pop, blues, cumbias, salsa, ritmos latinos.

¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?

Fender Jazzmaster



Epiphone Sheraton



Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?

“Que no se desafine a pesar de que utilices el vibrato, que no se desoctave a cada rato.”

¿Qué opina de las guitarras *headless*?

“No es como debería lucir una guitarra. Como que le hace falta algo”

¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?

“Que el cuerpo no esté hecho de más de 3 piezas, porque se pierde *sustain*.”

¿Qué guitarra(s) eléctricas tiene? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?

Le gusta:

“Me gusta el sonido *gordito* que tiene, sirve más que nada para rock pesado. La madera que tiene permite tener un buen *sustain*.”

No le gusta:

“Tiene un mal balance de peso. Cuando tocas de pie, el brazo se va hacia abajo.”
(Tiene problemas de *neck dive*).

Epiphone Sg G400



Le gusta:

“Es mi favorita porque es muy versátil. Con las 5 posiciones del switch puedes hacer una mezcla y conseguir un sonido propio.”

No le gusta:

“El potenciómetro de volumen está muy cerca de las cuerdas. Cuando estás tocando, puedes bajarle el volumen accidentalmente.”

Fender stratocaster



Le gusta:

“Cuando usas la pastilla del puente, da un sonido muy *twang*, para ese tipo de uso, es perfecta”

Squier Telecaster



¿Qué material prefiere?

“El sonido que buscas, nada más lo vas a lograr con los materiales con los que se ha obtenido anteriormente. Si me interesa sonar como instrumentos que se hacen de madera, necesito uno de madera.”

Usuario: Francisco E. Hombre, 24 años, biólogo – músico profesional

Contexto: Aprendió a tocar la guitarra en la preparatoria, desde entonces pertenece a una banda de hard rock. En guitarra eléctrica, toca hard rock, *glam metal* y música folclórica.

¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?
Quiere comprar una Les Paul. “La última guitarra que compré es una tipo Les Paul y quiero otra. Me gusta el puente *tune o matic* y el sustain. Dentro de mi vicio por las guitarras, nunca había tenido una Les Paul. Considero que las Gibson son demasiado caras y no valen la pena, hay otras opciones tipo Les Paul muy buenas.”

Guitarra tipo Les Paul



Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?
“Que las pastillas den un buen tono.”

¿Qué opina de las guitarras *headless*?
Sí me gustan, pero no son mi prioridad ahorita, tal vez en algún momento compre una. Considero que son muy caras las *headless* buenas.”

¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?
“Le doy más peso al tono que a la comodidad, pero busco ese tono; podría comprar una guitarra aunque no me gusten sus pastillas, porque me gusta experimentar cambiándolas.”

¿Qué guitarra(s) eléctricas tiene? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?

Le gusta:
“Se puede tocar sin muchos problemas por un precio accesible.”
No le gusta:
“Tiene poca versatilidad; tiene un puente de seis tornillos y 3 *single coils* que suenan prácticamente igual.”

Stratocaster sin marca



Le gusta:
“Es bastante resistente, de batalla. Y suena bastante bien.”
No le gusta:
“El puente es de 6 tornillos. Es problemático porque no te deja ni hacer cosas locas con la palanca ni tener la guitarra bien afinada.”

Dean Vendetta XTM



Le gusta:

“Mi guitarrista favorito es Tony Iommi, él utiliza una muy parecida.”

No le gusta:

“El *headstock* siempre se está bajando” (tiene problemas de *neck dive*).

Epiphone SG Goth



Le gusta:

“Es mi favorita, me gusta mucho su estética, yo la pinté y le he modificado varias piezas para que funcione mejor: le cambié las pastillas por unas Seymour Duncan y el Floyd Rose por uno serie 1000 con bloque de bronce.”

No le gusta:

“Es una guitarra económica y es muy evidente el *scarf joint* (el mástil está unido angularmente). En teoría eso no afecta el sonido, pero a mí no me gusta cómo se ve.”

Jackson Kelly js32



Le gusta:

“Tiene pastillas activas y eso me deja generar sonidos que con las demás no puedo.”

No le gusta:

“Es muy incómodo tocar sentado.”

Schecter Flying V



Le gusta:

“Compré una Fender mexicana porque sé que es algo que no me va a fallar, una buena base para modificar. Le cambié la pastilla simple del puente por una *hot rails* (doble con tamaño de simple), le puse un clavijero con candados y una cejuela de Tusq (grafito). Además, le cambié el puente por un Vega Trem, que se sujeta de dos puntos y cabe en el espacio de un puente normal de Strat pero tiene el rango completo de un Floyd Rose, me encanta ese puente.”

No le gusta:

“Es un diseño algo genérico.”

Fender Stratocaster personalizada



¿Qué material prefiere?

“No me cerraría a tener una guitarra de materiales alternativos, pero preferiría tener una que como base sí tuviera madera.”

Usuario: Izz. Hombre, 22 años, guitarrista profesional

Contexto: Aprendió a tocar guitarra a los 16 años, su padre es guitarrista y fue su maestro. En guitarra eléctrica toca glam rock y metal.

¿Compraría otra(s) guitarra(s)? ¿Cuál(es)?

“Solo quiero comprar dos o tres modelos más, y luego mandar a hacer *mi* guitarra. Mi guitarra personalizada tendría cuerpo de Stratocaster con la comodidad de una Telecaster.”

Stratocaster dorada



Fender Mustang Kurt Cobain (ya la tuvo, pero la vendió y la quiere nuevamente)



Para él, ¿qué es lo más importante en una guitarra eléctrica?
El sonido, la comodidad y el diseño. “De la vista nace el amor.”

¿Qué opina de las guitarras *headless*?

Le gustaría mucho probarlas, pero su estética no le gusta tanto.

¿Qué características busca en una guitarra eléctrica?

- Puente flotante “me gustan mucho los primeros Floyd Rose, los que aún no usaban candados.”
- “La comodidad de la telecaster y el brazo de ébano o maple.”

¿Qué guitarra(s) eléctricas tiene? ¿Qué cosas le gustan y qué cosas no le gustan de ella(s)?

“Suelo comprar guitarras por su diseño y comodidad, después de comprarlas, si lo considero necesario, cambio pastillas por EMG o Seymour Duncan.” No menciona tener problemas o preocupaciones por comodidad o peso de los instrumentos. Tiene 10 guitarras eléctricas actualmente y ha probado muchas más, se presentan sus tres favoritas.

Le gusta:

“Es mi favorita, es la más cómoda que tengo”

El puente flotante

Carvin Telecaster



Le gusta:

“Es muy cómoda.”

No le gusta:

El Floyd Rose dificulta cambiar afinaciones.

Fender Stratocaster



Le gusta:

“Es muy cómoda, aunque muchos dicen que no.”

“Se ve muy elegante.”

Gibson Les Paul Custom



¿Qué material prefiere?

“La madera, es un material más confiable. Si ya no hubiera guitarras nuevas de madera, compraría de segunda mano.”

37. Anexo IV: Índice de figuras

Fig.	Pp.	Obtenido de
1	2	International Harp Museum, 2009
2	3	Scott, 1944
3	3	(Atlas of Plucked Instruments, s.f.)
4	4	https://cdn.shopify.com/s/files/1/1814/0429/products/guitars-regal-rd-40-series-studio-dobro-with-power-reflex-sound-chamber-rd-40vs-squareneck-in-vintage-sunburst-1264057876521.png?v=1575933299
5	4	https://vignette.wikia.nocookie.net/pawnstarsthegame/images/0/04/1934_Rickenbacher_Frying_Pan_Guitar.png/revision/latest?cb=20160503232534
6	4	https://www.steelc6th.com/images/ricky_postwar2.gif
7	5	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Gibson_ES-150.png
8	5	https://www.jamzone.com/blog/753-the-story-behind-the-most-legendary-electric-guitars.html?currency=USD
9	5	https://reverb.com/p/gibson-les-paul-goldtop-1952 https://eusica.mx/fender-stories-collection-eric-johnson-1954-virginia-stratocaster-2-color-sunburst-guitarra-electric
10	6	https://eusica.mx/product/image/large/0149983300_vintera_60s_strat_0149983300_2.png https://glguitars.com/wp-content/uploads/2017/09/TI_LGY_120R40M21-front-1200.png https://static.gibson.com/product-images/Custom/CUSZJG839/Ebony/front-banner-1600_900.png https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/BLWhZgtPqnCei6wiQzjPDZ-1200-80.jpg https://www.schecterguitars.com/images/store/product/HELLRAISER%20SOLO%20I%20WHT%20TILT5.png
11	7	https://cdn.shopify.com/s/files/1/0183/0329/products/SGTR19AYNH1_3d23932a-d867-41c0-b2a5-a451beda1bd6_2048x2048.png?v=1604969365 https://www.cedem.info/item/images/zUxY5N2EtX.jpg https://www.stockmusical.com/14795-large_default/ltd-volsung-formato-sg.jpg https://www.mrcdinstrumentos.com.mx/shared/productos/13961/DSX17EBCH1.jpg https://www.fmicassets.com/Damroot/Zoom/0/2910134576_gtr_frt_001_rr.png https://medias.audiofanzine.com/images/normal/kiesel-h6-hyperdrive-3134461.png https://media.fanaticguitars.com/2018/04/strandberg-boden-prog-7-fishman-1.jpg https://skervesen.eu/wp-content/uploads/2016/06/Shoggie7_1.png https://www.gocguitars.com/mh7standard
12	9	https://relish.swiss/innovation/alu-sustain-frame/ https://www.ebg-instruments.de/instruments/electric-guitars/
13	9	Figura creada por el autor
14	11	Figura creada por el autor
15	11	Modificado a partir de https://www.stewmac.com/articles-and-video/online-resources/learn-about-truss-rod-installation-and-repair/working-with-carbon-fiber-reinforcement-materials.html

16	12	https://cycsistemas.com.ar/wp-content/uploads/2020/01/fender.jpg https://img.audiofanzine.com/images/u/product/normal/steinberger-spirit-gu-deluxe-47104.jpg
17	13	Fotografías tomadas por el autor
18	13	Fotografías tomadas por el autor
19	14	https://www.dawsons.co.uk/media/catalog/product/cache/1/image/1200x/6b9ffbf72458f4fd2d3cb995d92e8889/i/b/ibanez_afv75_hollowbody_electric_guitar_-_vintage_amber_burst_-_headstock.jpg https://i.pining.com/564x/78/82/d2/7882d2627f3216c526d1793de914e359.jpg https://www.ucreative.com/wp-content/uploads/2015/12/strat-head-630-80.jpg https://i.pining.com/originals/bf/e2/ec/bfe2ec5ba6e71301d2949bdf63f5b9f1.jpg https://megamusic.blob.core.windows.net/images/0018174_ibanez-sa560mb-electric-guitar-aqua-blue-flat.jpg
20	14	https://images.reverb.com/image/upload/s--rQQkBWlo--/f_auto,t_supersize/v1539613854/slnxv3asujdhw8zoflrn.jpg
21	14	https://www.bax-shop.nl/blog/wp-content/uploads/2015/05/elektrische-gitaar-afstellen-truss-rod-2.jpg
22	15	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Guitar_headstock_angle.png https://www.youtube.com/watch?v=diwwVtiqsP4
23	15	Figura creada por el autor
24	15	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Guitar_headstock_angle.png https://www.youtube.com/watch?v=EbU4rW7TAJU&t=1081s
25	16	Generada usando https://static.gibson.com/product-images/USA/USAI9Q269/Ebony/LPCS00EBNH1_neck_side.png
26	16	Fotografías tomadas por el autor
27	16	https://www.stewmac.com/articles-and-video/online-resources/learn-about-truss-rod-installation-and-repair/working-with-carbon-fiber-reinforcement-materials.html
28	16	https://hazeguitars.com/blog/martin-guitar-non-adjustable-truss-rods
29	17	https://www.stewmac.com/articles-and-video/online-resources/learn-about-truss-rod-installation-and-repair/working-with-carbon-fiber-reinforcement-materials.html
30	17	https://liacustomguitars.com/index.php/2019/10/03/como-afecta-la-escala-de-la-guitarra-y-el-perfil-del-mastil-a-mi-forma-de-tocar/
31	18	https://www.sweetwater.com/insync/what-is-fingerboard-radius/
32	18	https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/electric_guitar/manufacturing/manufacturing002.html
33	19	https://www.12fret.com/wp-content/gallery/fender_jazzmaster_1961/fender_jazzmaster_1961_neckplate_1.jpg

		https://3.bp.blogspot.com/-UITsO2cK-n8/UP_jvKoqtpl/AAAAAAAAATE/vQl11Od83wk/s1600/SDC12942edit.png
34	20	https://media.sweetwater.com/api/i/q-82__ha-2dd3fb12302c3435__hmac-12d2ca9e2cb565bfe3c02f7beca686d39b533819/images/items/750/DSVANCH-large.jpg https://www.jalmus.net/IMG/arton755.png?1344605461, https://cdn.shopify.com/s/files/1/0183/0329/products/0144603506.png?v=1522694965 https://media.guitarcenter.com/is/image/MMGS7/Boden-Standard-6-Tremolo-Electric-Guitar-Bengal-Burst-Quilt/L46982000002000-00-1200x1200.jpg https://lh3.googleusercontent.com/proxy/t9C3tzfVODoRfSPgUUmCgybA8NmSYXwKuTRVBGpUavvmd0NbhbfSXRwNFrep8uE2D4NvhptbXFIPCdnKcVomqIJ9m07hME1gzIFTu-wjbdBU2NUwuk2WDPSWMRIHwgKEvumJFai89BXEBQ https://i.pinimg.com/originals/3e/ec/2c/3eec2c08132707ca1845a87d36dcfce4.png https://www.best-price.audio/media/product/244/buy-gibson-explorer-2018-electric-guitar-antique-natural-white-pickguard-online-usd-1-732-best-price-7bf.png
35	20	https://musiccritic.com/equipment/guitars/best-hollow-body-guitar-semi-hollow-guitar/
36	21	https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/71vSgERxZRL._AC_SY879_.jpg https://musiccritic.com/equipment/guitars/best-hollow-body-guitar-semi-hollow-guitar/ https://media.sweetwater.com/api/i/q-82__ha-2f3a2ecf2557fd41__hmac-67e7ce81b65984bf33292cfb86b491eaf877e556/images/items/750/330ThinJG-large.jpg
37	22	Figura basada en la publicada por (Varieschi & Gower, 2010)
38	23	https://guitargearfinder.com/wp-content/uploads/2018/07/multiscale-guitar.jpg
39	24	https://www.thomann.de/pics/bdb/362928/11332382_800.jpg
40	24	Figura creada por el autor
41	25	Figura creada por el autor
42	25	https://hipshotproducts.com/collections/guitar-headless/products/6-string-guitar-headless-system
43	25	https://strandbergguitars.com/wp-content/uploads/2018/05/bd7ct-17o-m-f-na_a.png https://strandbergguitars.com/product/tuner-assembly-black/
44	26	https://cdn.shopify.com/s/files/1/0183/0329/products/0118022712.png?v=1575142969 https://www.guitarmeet.com/what-are-the-different-kinds-of-electric-guitar-bridges/#Fixed_Guitar_Bridges_vs_TremoloFloating_Bridges https://sc1.musik-produktiv.com/pic-010119370_01xxl/fender-eric-johnson-1954-virginia-stratocaster.jpg
45	27	https://img.audiofanzine.com/images/u/product/normal/gibson-les-paul-florentine-with-bigsby-vintage-sunburst-88733.jpg https://i.pinimg.com/originals/37/27/ee/3727eea29396da900b4784e09b8ab2e8.png
46	28	https://megamusic.blob.core.windows.net/images/0018349_ibanez-rg370ahmz-electric-guitar-blue-moon-burst.jpg

		https://static.turbosquid.com/Preview/2020/01/03__12_39_36/Floyd_Rose_Tremolo_01.jpg7AF41D8B-427D-4EBB-9CA7-427C04C95ABALarge.jpg
47	28	https://static.wixstatic.com/media/cad0eb_0f92ffaaf4024480b8ae780f6bff4885~mv2_d_1200_1200_s_2.png https://www.thomann.de/es/floyd_rose_frx_tremolo_system_gold.htm
48	29	https://hipshotproducts.com/collections/guitar-headless/products/6-string-guitar-headless-tremolosystem
49	29	Basada en https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/guitar-pickup
50	29	https://images.equipboard.com/blog_content/single-coil-pickup-vs-humbucker.jpg
51	30	https://www.emgpickups.com/pub/media/catalog/product/8/1/81.jpg
52	31	(Paiva & Välimäki, 2012)
53	31	https://shop.fender.com/es-MX/electric-guitars/jaguar/american-professional-jaguar/0114010700.html?rl=en_US https://shop.fender.com/es-MX/electric-guitars/telecaster/deluxe-nashville-tele/0147502301.html?rl=en_US https://shop.fender.com/es-MX/electric-guitars/telecaster/american-professional-telecaster-deluxe-shawbucker/0113082721.html?rl=en_US https://shop.fender.com/es-MX/electric-guitars/stratocaster/american-professional-stratocaster-hss-shawbucker/0113042706.html?rl=en_US
54	32	https://humbuckersoup.com/guitar-electronics/3-way-switch-vs-5-way-switch/
55	32	https://cdn.shopify.com/s/files/1/1169/7684/products/Paul_Reed_Smith_PRS_Custom_22_Dark_Cherry_Burst_10-Top_Birds_Used_Electric_Guitar_FBV.jpg?v=1575932217
56	33	https://www.oddguitars.com/americangraffitismall.jpg REVISAR LA OTRA
57	33	https://usanbuenaventuraelectronica.files.wordpress.com/2015/10/ebow.jpg
58	34	http://www.wiredguitarist.com/wp-content/uploads/2016/05/C1FRS5-750x400.jpg
59	34	https://www.jimmyegypt.com/wp-content/uploads/2016/11/310930_u6rfyt.jpg
60	34	https://th.static-thomann.de/thumb/orig/pics/bdb/283943/12017868_800.jpg
61	35	https://www.tremol-no.com
62	35	(WayBackMachine, 2008).
63	35	https://line6.com/variix-modeling-guitars/shuriken
64	36	https://www.light4sound.com/updates/2018/3/10/what-is-the-opik
65	36	https://aristidesinstruments.com/story/production-process
66	38	Figura creada por el autor
67	46	Figura creada por el autor
68	46	Figura creada por el autor
69	47	Figura creada por el autor

70	49	Figura creada por el autor
71	54	https://hazeguitars.com/blog/addendum-locking-tuner-advice-debunked
72	54	Figura creada por el autor
73	55	Figura creada por el autor
74	56	Figura creada por el autor
75	56	Figura creada por el autor
76	56	Figura creada por el autor
77	62	Figura creada por el autor
78	65	Figura creada por el autor
79	66	Figura creada por el autor
80	67	Figura creada por el autor

Trabajos citados

Yamaha Corporation. (n.d.). *How the Electric Guitar is Made: Shaping the neck and body*. Retrieved from Musical Instrument Guide - Yamaha Corporation:
https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/electric_guitar/manufacturing/manufacturing002.html

(2008, Abril 23). Retrieved from WayBackMachine:
<https://web.archive.org/web/20080423191532/http://www.gibson.com/en-us/divisions/gibson%20usa/products/lespaul/robotlpstudioLtd/>

Ahvenainen, P. (2018). Anatomy and mechanical properties of woods used in electric guitars. *IWA Journal*, 1-18.

Anderson, P., & Tushman, M. L. (1990). Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model. *Administrative Science Quarterly*, 604-633.

Aristides Instruments. (2022, Febrero 15). *History*. Retrieved from Aristides Instruments:
<https://aristidesinstruments.com/story/history>

Aristides Instruments. (2022, Febrero 15). *Production Process*. Retrieved from Aristides Instruments: <https://aristidesinstruments.com/story/production-process>

Atlas of Plucked Instruments. (n.d.). Retrieved from
<https://www.atlasofpluckedinstruments.com/lutes.htm>

- Bowcott, N. (2020, Marzo 9). *Active vs. Passive Pickups: What's the Difference? Which Is Best?* Retrieved from Sweetwater: <https://www.sweetwater.com/insync/active-vs-passive-pickups-whats-the-difference-which-is-best/>
- Brunson, M. (2017, Marzo 23). *Headless Guitars: Who Makes Them and Why*. Retrieved from Reverb: <https://reverb.com/news/headless-guitars-who-makes-them-and-why>
- Camilleri, M. A. (2018). Market Segmentation, Targeting and Positioning. In M. A. Camilleri, *Travel Marketing, Tourism Economics and the Airline Product* (pp. 69-83). Suiza: Springer.
- Carr, D. (2018, Junio 14). *What Is Fingerboard Radius?* Retrieved from Sweetwater: <https://www.sweetwater.com/insync/what-is-fingerboard-radius/>
- Conard, N. J., & Malina, M. (2008). New Evidence for the Origins of Music from the Caves of the Swabian Jura. *Studien zur Musi-karchäologie VI, Orient-Archäologie 22*, 13-22.
- de Looper, C. (2019, Diciembre 26). *Solid body vs semi hollow body vs hollow body electric guitars: which one is right for you?* Retrieved from All Things Gear: <https://allthingsgear.com/solid-body-vs-hollow-body-guitars/>
- Deimos. (n.d.). *Note frequency table*. Retrieved from <https://www.deimos.ca/notefreqs/>
- Diegel, O. (2011). *Odd Guitars: American Graffiti 3D printed Guitar*. Retrieved from Odd Guitars: <https://www.oddguitars.com/americangraffiti.html>
- Elixir Strings. (n.d.). *Guitar Strings Tension Charts*. Retrieved 2021, from Elixir Strings: <https://www.elixirstrings.com/support/string-tension-for-tuning-guitar>
- Evertune. (n.d.). *What is EverTune?* Retrieved from Evertune: https://www.evertune.com/resources/what_is_evertune.php
- Fernandes. (n.d.). *History*. Retrieved from Fernandes Official Web Site: <https://www.fernandes.co.jp/company/history/>
- French, M., & Handy, R. (2006). Sustainability and Life Cycle Management in Guitar Production. 1-16.
- Genani, G., Molenbroek, J., & Dekker, M. (2013). Design of an ergonomic electric guitar. *Tijdschrift voor Ergonomie*, 43-49.
- Gibson History*. (n.d.). Retrieved from Chasing Guitars: <http://chasingguitars.com/gibson-history/>
- Gotoh. (2018). Parts Collection. *Guitar, Bass & string instruments parts*. Gunma, Japón.
- Grimes, D. R. (2014). String Theory - The Physics of String-Bending and Other Electric Guitar Techniques. *PLOS ONE*, 1-9.
- Groves, T., & Kemp, J. A. (2019). Applicability of the Capstan Equation to Guitar Strings. *Archives of Acoustics Vol. 44 No. 3*, 459–465.
- Heet Sound Products. (n.d.). *The Amazing Ebow: Lessons*. Retrieved from The Amazing Ebow: <https://ebow.com/lessons.php?cat=1>

- Henzig, L. (2017). *A History of the Electric*. Bertrange: la Belle Etoile.
- Hodge, C. (2019, Abril 8). *Coil Split vs Coil Tap – What’s The Difference?* Retrieved from Andertons Music Co: <https://blog.andertons.co.uk/labs/coil-split-vs-coil-tap>
- Houghtaling, A. B. (n.d.). *Decoding Standard Pickup Arrangements*. Retrieved from Fender: <https://www.fender.com/articles/tech-talk/decoding-standard-pickup-arrangements>
- IEOM Society International. (2022, Febrero 15). *Proceedings - IEOM Monterrey 2021*. Retrieved from IEOM Society International: <http://www.ieomsociety.org/monterrey2020/proceedings/>
- International Harp Museum. (2009). *History of the Harp*. Retrieved from <http://www.internationalharpmuseum.org/visit/history.html>
- Kubilay, I. A. (2018). Optical Pickups for String Musical Instruments. *International Conference on Science and Technology*.
- LeVan, J. (2015, Marzo 20). *Guitar Shop 101: Tips for Replacing a 3-way Toggle*. Retrieved from Premier Guitar: <https://www.premierguitar.com/articles/22253-guitar-shop-101-tips-for-replacing-a-gibson-style-3-way-toggle-switch>
- Light4Sound. (n.d.). *THE δ PIK OPTICAL GUITAR PICKUP*. Retrieved from Light4Sound: <https://www.light4sound.com>
- Line 6. (2018). *Shuriken Variax Guitars*. Retrieved from Line 6: <https://line6.com/variax-modeling-guitars/shuriken/>
- Line 6. (2020). *Variax: The electric guitar, evolved*. Retrieved from Line 6: <https://line6.com/variax-modeling-guitars/>
- Maniac Music . (n.d.). Retrieved from Sustainiac Home Page: <https://www.sustainiac.com>
- Neyses, B., & Sandberg, D. (2015). A new methodology to select hardwood species for wooden products. *Wood Material Science & Engineering*, 344-352.
- Owens, J. (n.d.). *How to Use the Stratocaster Pickup Selector Switch*. Retrieved from Fender: <https://www.fender.com/articles/tech-talk/sounds-aplenty-the-stratocaster-pickup-selector-switch>
- Owens, J. (n.d.). *The 3 Neck Attachment Methods You Should Know*. Retrieved from Fender: <https://www.fender.com/articles/tech-talk/the-3-neck-attachement-methods-you-should-know>
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design. A Systematic Approach*. Londres: Springer.
- Paiva, R., & Välimäki, V. (2012). Acoustics and Modeling of Pickups. *Journal of the Audio Engineering Society. Audio Engineering Society*, 768,782.
- Paté, A., Navarret, B., Dummoulin, R., Le Carrou, J.-L., Fabre, B., & Doutaut, V. (2012). About the electric guitar: a cross-disciplinary context for an acoustical study. *Acoustics 2012*.

- Pérez de Arce, J. G. (2013). Clasificación Sachs-Hornbostel de instrumentos. *Revista Musical Chilena*, 42-80.
- Prendergast, M. J. (1990). Beyond the infinite. *Sound on sound*, 72-74. Retrieved from <http://www.muzines.co.uk/articles/beyond-the-infinite/5836>
- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson Educación.
- Reynolds, M. J. (2001, Octubre 9). John Dopyera's guitar legend lives on. *The Slovak Spectator*.
- Richlite. (2022, Febrero 15). *About: Is it really paper?* Retrieved from Richlite: <https://www.richlite.com/pages/about>
- Sandvik AB. (2019, Abril 9). *How Sandvik Additive Manufacturing 3D printed the world's first smash-proof guitar*. Retrieved from Sandvik Additive Manufacturing: <https://www.additive.sandvik/en/news-trends/archive/2019/04/how-sandvik-additive-manufacturing-3d-printed-the-worlds-first-smash-proof-guitar/>
- Scott, N. E. (1944). The Lute of the Singer Ḥar-Mosë. *The Metropolitan Museum of Art Bulletin*, 159-163.
- Slawek, S. (1987). *Sitār Technique in Nibaddh Forms*. Delhi: Motilal Banarsidass.
- Stewart-MacDonald. (n.d.). *Neck Construction Tips and Techniques*. Retrieved from StewMac: <https://www.stewmac.com/articles-and-video/online-resources/neck-building-and-repair-and-setup/neck-construction-tips-and-techniques.html>
- Stewart-MacDonald. (n.d.). *Working with Carbon Fiber Reinforcement Materials*. Retrieved from StewMac: <https://www.stewmac.com/articles-and-video/online-resources/learn-about-truss-rod-installation-and-repair/working-with-carbon-fiber-reinforcement-materials.html>
- Sustainiac. (2018). *The Sustainiac "Stealth ProTM" electromagnetic-type sustainer Instalation Page*. Retrieved from Sustainiac Web site: <https://www.sustainiac.com/install.htm>
- Sweetwater. (1999). *Faraday Shield (or Faraday Cage)*. Retrieved from Sweetwater: <https://www.sweetwater.com/insync/faraday-shield-faraday-cage/>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2019, Enero 18). *Lute*. Retrieved from Encyclopædia Britannica: <https://www.britannica.com/art/lute>
- Tontini, G. (2007). Integrating the Kano Model and QFD for Designing New Products. *Total Quality Management & Business Excellence*, 599-612.
- Varieschi, G. U., & Gower, C. M. (2010). Intonation and compensation of fretted string instruments. *American Journal of Physics*, 47-55.
- Vezzoli, C., & Manzini, E. (2008). *Design for Enviromental Sustainability*. Milan: Springer.
- Vilas Varela, A. (2019, Octubre 3). *¿Cómo afecta la escala de la guitarra y el perfil del mástil a mi forma de tocar?* Retrieved from Lía Custom Guitars: <https://liacustomguitars.com/index.php/2019/10/03/como-afecta-la-escala-de-la-guitarra-y-el-perfil-del-mastil-a-mi-forma-de-tocar/>

- Waage Delgadillo, H. S., Rafael, G. P., Dorador González, J. M., Covelo Villar, A., Hernández Gallegos, M. A., Valdez Navarro, R., & Barba Pingarrón, A. (2021). Intensely usable electric guitar design with optimized wood utilization. *MEMORIAS DEL XXVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, DM136-DM143. Retrieved from <https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/MemoriasXXVII.pdf>
- Wacker, D. (2014, Diciembre 26). *Mod Garage: A PRS-Style Pickup Selector for Dual-Humbucker Guitars*. Retrieved from Premier Guitar: <https://www.premierguitar.com/articles/21777-mod-garage-a-prs-style-pickup-selector-for-dual-humbucker-guitars>
- Wired Guitarrist. (2019, Mayo 1). *Why Do Hollow Body Guitars Feedback More?* Retrieved from Wired Guitarrist: <http://www.wiredguitarist.com/2019/05/01/why-do-hollow-body-guitars-feedback-more/>
- Yano, H., Furuta, Y., & Nakagawa, H. (1996). Materials for guitar back plates made from sustainable forest resources. *The Journal of the Acoustical Society of America* 101, 1112-1119.