

ANÁLISIS VIBRATORIO DE VIOLINES PARA ESTIMAR SU PRECIO BASADO EN TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING

Isabel Villa Ruiz^{1*}
Leticia Martínez Cano²
Roberto San Millán Castillo¹
Rebeca Goya Esteban¹

¹Universidad Rey Juan Carlos – EIF - Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Camino del Molino, 5, Fuenlabrada (Comunidad de Madrid, España)

²Universidad de Castilla-La Mancha – ITct – Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones, Campus Universitario, s/n, Cuenca (Cuenca, España)

RESUMEN

El proceso de tasación de un instrumento de cuerda es una tarea compleja que contempla aspectos como la época en la que fue diseñado o el luthier que lo fabricó. Fuera de este proceso queda el análisis sonoro del instrumento que se reduce a valoraciones personales del perito experto.

En este trabajo se pretende abordar la posibilidad de evaluar un instrumento de cuerda, en concreto un violín, a partir de su análisis vibratorio midiendo la aceleración sobre la tapa superior del violín y sus características físicas para poder deducir su precio final en el mercado basado en técnicas de Machine Learning.

ABSTRACT

The appraisal process for a stringed instrument is a complex task that includes aspects such as the period in which it was designed or the luthier who made it. The sound analysis of the instrument is left out of this process, which is reduced to the personal assessments of the expert valuator.

This paper aims to address the possibility of evaluating a stringed instrument, specifically a violin, from its vibratory analysis by measuring the acceleration on the top of the violin and its physical characteristics in order to deduce its final price in the market based on Machine Learning techniques.

Palabras Clave— violín, aceleración, machine learning

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el proceso de tasación de un instrumento musical de cuerda los peritos expertos tratan de responder a preguntas como ¿de qué material está hecho el instrumento?,

¿cuál es su procedencia?, ¿qué casa de luthieres lo fabricó? o ¿es su estructura original? Sin embargo, en el proceso de tasación no suelen estudiar, de forma objetiva, el sonido que produce ese instrumento en concreto.

Esta es la principal motivación para realizar un estudio de diferentes instrumentos musicales de cuerda, violines en particular, para poder clasificarlos atendiendo a la información física que se puede extraer de ellos de una manera sencilla y directa.

La catalogación que se ha realizado atiende a una serie de características que permiten identificar la clase a la cual pertenece cada uno de los violines estudiados, teniendo cada una de las clases un rango de precios diferente.

Esta clasificación comienza con el estudio de las características que influyen directamente en la calidad sonora del violín, como son las piezas que lo forman y la relevancia en cada parte del sistema acústico que este genera.

Tras esta primera recolección de datos sobre el violín, se continua con la colocación de un acelerómetro en la tapa del violín para medir de forma objetiva el comportamiento vibratorio del instrumento cuando se tocan al aire cada una de sus cuatro cuerdas [1-4].

Tras la recolección de toda esta información, se genera una base de datos para poder predecir el rango o la clase a la que pertenece el instrumento con herramientas de *machine learning*.

Con todos estos datos, se podrá predecir una clasificación que ayudará a poner precio en futuras tasaciones a los peritos expertos.

* **Autor de contacto:** i.villa@alumnos.urjc.es

Copyright: ©2023 Isabel Villa et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. VARIABLES FÍSICAS DEL VIOLÍN

Antes de comenzar con el estudio del instrumento, es necesario conocer más sobre su construcción. Para ello, se contactó con Pedro Ruiz del Árbol, un luthier que realiza su trabajo en la localidad madrileña de Morazarzal. Con su ayuda, seleccionamos algunas de las características físicas que nos darán información relevante para diferenciar violines entre sí, obteniendo de esta manera una idea general de cada instrumento con una recogida de datos sencilla.

Las características físicas del violín seleccionadas son las siguientes: altura del cuerpo de la caja, anchura superior de la caja, anchura inferior de la caja, anchura de la cintura de la caja, largo y ancho de la abertura de la efe (ver Figura 1). Estas dimensiones nos ayudan a conocer el volumen de aire relativo de cada uno de los violines, además de conocer la capacidad de transmisión aérea del instrumento hacia el exterior gracias a las efes.

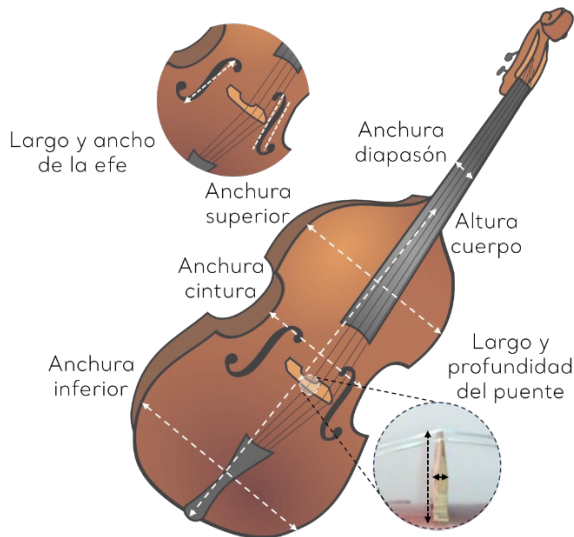


Figura 1. Dimensiones físicas del violín registradas para su clasificación.

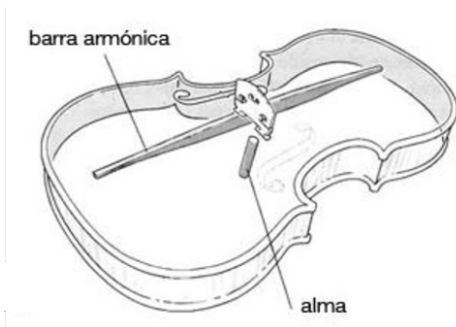


Figura 2. Colocación del alma en el interior de la caja del violín [5].

Además, también se recogieron dimensiones de algunas piezas que tienen relevancia en la acústica del violín como la anchura del diapasón, la altura y profundidad del puente o la colocación del alma del violín (ver Figura 2). Esto es debido a la relación entre los diferentes grosores y su capacidad para transmitir vibración a través del instrumento. Además, la colocación del alma influye, de forma directa, con el sonido final del instrumento.

Por último, se recopiló información relativa a las cuerdas utilizadas, ya que son las principales involucradas en la vibración del instrumento, así como el precio del violín en el mercado.

3. ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL VIBRATORIA

3.1. Instrumentación y configuración

Para realizar las medidas de vibración sobre los violines se ha utilizado un acelerómetro conectado a un analizador de vibraciones para poder monitorizar la señal vibratoria en tiempo real mientras se realizaba la medida.

El acelerómetro utilizado es un piezoeléctrico ICP de la marca PCB, modelo 352C33, con una sensibilidad de 100 mV/g [6]. Para recopilar la información relativa a la vibración de los violines se ha utilizado un analizador Soundbook con el software de adquisición de datos Samurai.

Para realizar las medidas, se seleccionó el rango de frecuencia desde 20 Hz a 20.000 Hz, se realizó un análisis en 1/3 de octava cada 0.02 s y un análisis FFT en el que se registró una muestra por cada 6.25 Hz cada 0.04 s.

3.2. Procedimiento del ensayo de medida de vibración

El acelerómetro se situó en la tapa superior del violín, entre el puente y el cordal y centrado bajo las cuerdas. Esto es debido a que este es el punto de mayor vibración del instrumento. En este punto en concreto confluyen las transmisiones de vibración de las cuerdas al puente, de aquí a las tapas a través de la barra armónica y el alma. El esquema del ensayo de vibración puede verse en la Figura 3.

Para fijar el acelerómetro a la tapa del violín se usó cera de abeja como adhesivo porque no deja residuo ni daña el barniz de los violines tras la realización de las medidas. Además, su uso es muy sencillo, con poca cantidad aplicada en la tapa inferior del acelerómetro y una vez situado en la posición de medida solo hay que presionar unos segundos para que el acelerómetro quede fijado. En la Figura 4 se puede ver la colocación final del acelerómetro fijado con cera de abeja. Con el fin de evitar que de un ensayo a otro se alteraran resultados en las mediciones de vibración, se tomaron una serie de precauciones:

- Todas las medidas se realizaron con el mismo intérprete para que tanto la manera de sujetar el violín como la técnica aplicada para tocar las diferentes cuerdas no se viera influenciadas en ninguno de los ensayos.

- Se utilizó el mismo arco en todas las mediciones.
- Se colocó la misma almohadilla bajo el violín en cada ensayo.
- En el caso de que se registrara algún efecto no deseado del arco sobre la cuerda o cualquier otro evento involuntario y aleatorio que perjudicara la recogida de muestras limpias, las medidas se repitieron.
- Los violines siempre fueron afinados antes de la realización de las mediciones, siguiendo el estándar $La_4=440$ Hz.

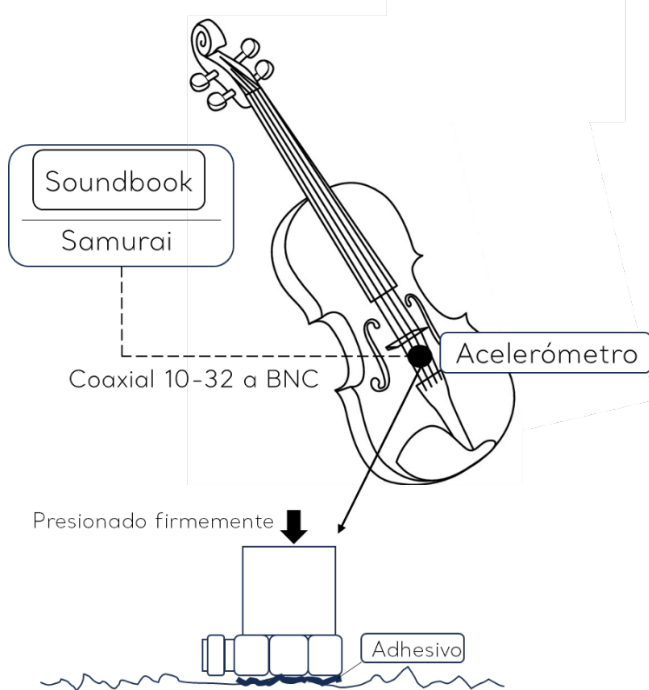


Figura 3. Esquema del ensayo de vibración.



Figura 4. Colocación del acelerómetro en el violín.

Una vez afinado el violín, colocado y conectado el acelerómetro sobre la tapa del violín y configurado el equipo analizador, se realizaron las diferentes mediciones. Las notas seleccionadas para el estudio son las cuerdas al aire del violín: Sol₃, Re₄, La₄ y Mi₅ cuyas frecuencias

fundamentales son 195 Hz, 293.6 Hz, 440 Hz y 659.3 Hz respectivamente. De cada una de las cuerdas se registraron las medidas que fueron necesarias hasta que se obtuvo una muestra limpia. En la Figura 5 puede verse el montaje real de las mediciones.



Figura 5. Ensayo de medición de la señal vibratoria de un violín.

En total se realizaron mediciones de 19 violines diferentes. De los 19 violines medidos, 5 fueron prestados por el luthier Pedro Ruiz del Árbol, construidos durante el 2018, y el resto fueron prestados por miembros de la Orquesta de la Universidad de Alcalá de Henares.

Los precios de los violines recopilados oscilan en el mercado entre los 300€ y los 15000€. Para la clasificación con *machine learning*, se dividieron los violines en tres clases finales dependiendo de su precio: baja, media y alta. Esta clasificación se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de los violines en clases según su precio.

Clase			
	Baja	Media	Alta
Violines	Violín 8 300€	Violín 16 1200€	Violín 9 4000€
	Violín 7 500€	Violín 11 1200€	Violín 14 10000€
	Violín 10 500€	Violín 1 1300€	Violín 18 12000€
	Violín 5 800€	Violín 4 1300€	Violín 13 15000€
	Violín 17 800€	Violín 3 2000€	
	Violín 19 1000€	Violín 6 2000€	
	Violín 15 1000€	Violín 2 3000€	
		Violín 12 3000€	

4. PROCESADO DE LAS MEDICIONES DE VIBRACIÓN

4.1. Estudio preliminar

En primer lugar, se seleccionaron 6 violines, dos de cada clase descrita en la Tabla 1, para realizar un estudio de comportamientos y patrones entre las medidas. Los violines seleccionados fueron los números 7 y 14 para la representación de la clase baja, los números 2 y 6 para la calidad media y los violines número 13 y número 19 para la calidad alta.

Con esta primera selección se pudieron comparar los resultados obtenidos del cálculo de la FFT de las medidas de aceleración para cada uno de los violines en dB para todas las cuerdas al aire. En la Figura 6 se puede ver la comparación de los seis violines cuando se toca la nota La₄.

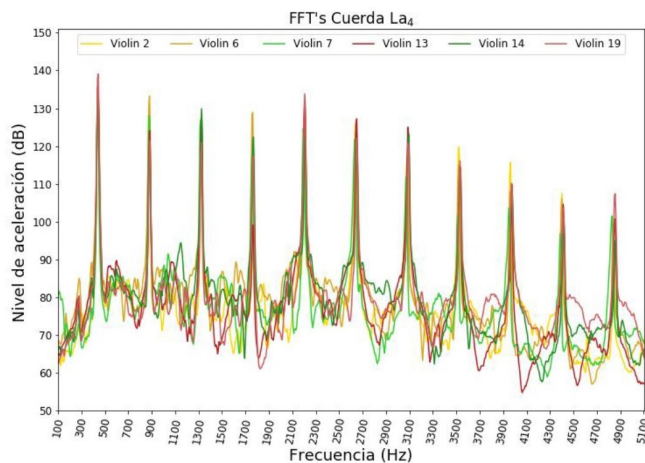


Figura 6. Comparación del nivel de aceleración analizado con FFT de la nota La₄ de los seis violines seleccionados.

En un análisis preliminar, se puede observar que tanto el nivel de aceleración en dB de la frecuencia fundamental, así como en cada uno de los armónicos, es diferente en cada uno de los violines ya que esta es la principal característica que diferencia unos violines de otros. Por este motivo, para poder comparar de forma estadística estos resultados, se evaluó la media y la mediana de todas las mediciones de aceleración realizadas en cada una de las cuerdas de cada violín. Tanto la media como la mediana de las muestras por cada nota siguen un patrón muy similar con la excepción de los resultados obtenidos en los picos de los armónicos, donde se observan resultados de la media inferiores a la mediana en varias ocasiones para todas las cuerdas. Un ejemplo de este análisis se puede ver en la Figura 7.

Con estos resultados preliminares, llegamos a las siguientes conclusiones: en primer lugar, la frecuencia fundamental no es siempre la que mayor nivel de aceleración presenta respecto a sus armónicos, los armónicos de cada violín en la misma cuerda tienen diferentes respuestas y, cuando evaluamos la media y la

mediana, podemos observar grandes diferencias entre los niveles de aceleración de la FFT en dB en cada uno de los armónicos que son distintos en cada uno de los violines.

Tras estas observaciones, la búsqueda se centró en la característica representativa de la señal vibratoria en el nivel de aceleración de las diferentes frecuencias de resonancia del instrumento. Esta señal resultó ser el porcentaje de la diferencia de niveles de aceleración de los principales armónicos con respecto a la frecuencia fundamental para cada una de las cuerdas de cada uno de los violines.

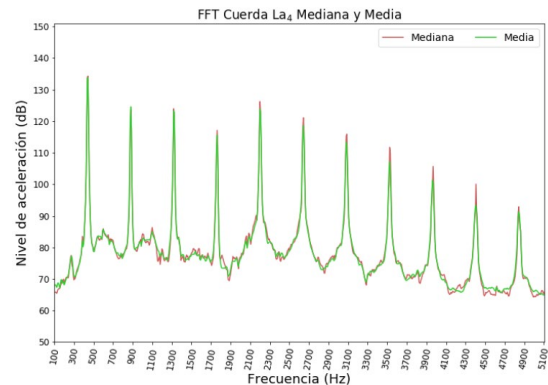


Figura 7. Comparación de la media y la mediana de la nota La₄.

4.2. Cálculo del porcentaje de diferencias

Calcular el porcentaje de la diferencia existente entre el nivel de aceleración de los armónicos y la frecuencia fundamental nos permite conocer la distribución energética en las frecuencias de resonancia de cada instrumento.

Para ello, hay que identificar la frecuencia fundamental y los armónicos de cada uno de los FFT de las cuerdas registradas. Después, para cada uno de los armónicos se ha calculado el porcentaje de la diferencia respecto al de la frecuencia fundamental.

Para evaluar los resultados, se ha representado con un valor negativo los resultados obtenidos del porcentaje de la diferencia cuando el valor del armónico es inferior al de la frecuencia fundamental y con un valor positivo en el caso contrario.

Las mayores diferencias las encontramos en las cuerdas graves del instrumento, Re₄ y Sol₃, donde las diferencias de los valores de los armónicos siempre son positivas respecto al nivel de aceleración de la frecuencia fundamental (ver Figura 8 para el caso particular de Re₄). Mientras que, en las cuerdas agudas, La₄ y Mi₅, donde los armónicos muestran un comportamiento generalmente constante respecto al nivel de la vibración de la frecuencia fundamental exceptuando casos aislados poco relevantes (ver Figura 9 para el caso de Mi₅).

Como representación de la señal vibratoria para el diseño de la base de datos, se recopiló el porcentaje de la diferencia de los primeros 10 armónicos con respecto a la frecuencia fundamental.

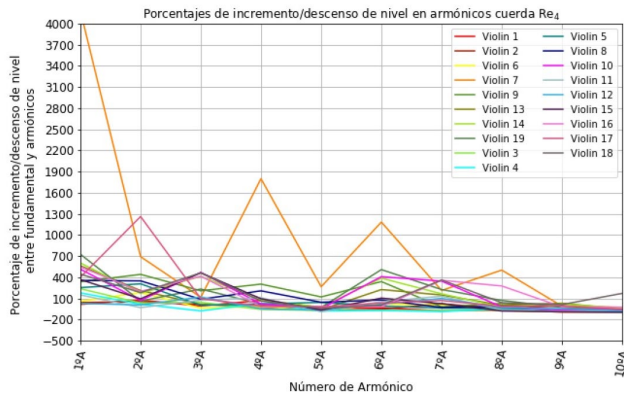


Figura 8. Porcentaje de la diferencia de nivel en armónicos de la cuerda Re_4 .

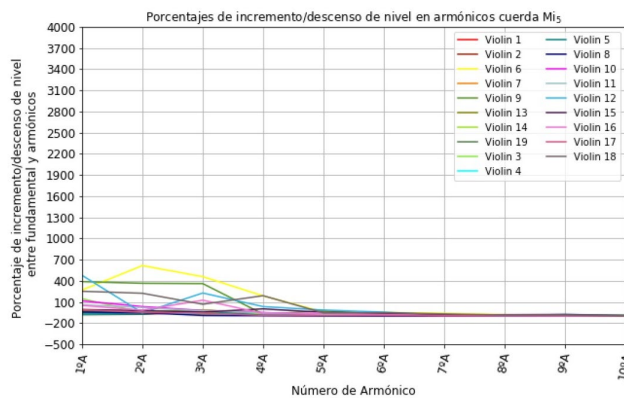


Figura 9. Porcentaje de la diferencia de nivel en armónicos de la cuerda Mi_5 .

5. ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN DE MACHINE LEARNING

5.1. Definición de la base de datos

El conjunto de los datos de entrada, X , está formado por una matriz que contiene todas las características que hemos recopilado de los violines. Estas características son las 12 características físicas del instrumento y las 10 características representativas de la vibración del violín. Esto hace un total de 22 características: marca de las cuerdas, espesor del diapasón, espesor y altura del puente, ancho superior y ancho inferior de la caja, ancho de la cintura de la caja, altura de la caja, ancho y largo de la efe, posición horizontal y vertical del alma y las diferencias de los 10 armónicos seleccionados. Como se midieron 19 violines y se han evaluado 4 notas en cada uno de ellos, en total tenemos 76 mediciones en el conjunto de muestras.

El conjunto de datos de salida, Y , está formado por la matriz que contiene una sola columna, con la clasificación que se le

puede asignar a cada instrumento siendo esta “alta”, “media” o “baja”.

5.2. Selección de los algoritmos

Para poner a prueba la base de datos creada con los datos de los violines se han seleccionado dos algoritmos de clasificación debido a que la exploración de los datos es sencilla y se puede valorar la importancia de las características, son algoritmos simples y fáciles de interpretar, se adaptan a los objetivos propuestos y se obtiene un mejor ajuste cuando la base de datos es pequeña, como es nuestro caso.

Estos algoritmos, incluidos en la biblioteca *Scikit-learn* [7] de *machine learning* para Python, son:

- “Logistic Regression Classifier” que nos permite estimar la probabilidad de una variable cualitativa, en nuestro caso “alta”, “media” o “baja”, en función de variables cuantitativas, en nuestro caso “espesor del puente” o “ancho del diapasón”. Nos permite realizar una asignación final en función de probabilidades predichas [8].
- “Decision Tree Classifier” consigue, mediante el análisis de datos y sus salidas, decidir la mejor forma de realizar las diferentes decisiones, consiguiendo de esta manera una predicción con mayor probabilidad de acierto [9].

5.3. Preparación de la configuración de los algoritmos

El conjunto de datos de entrada, todos numéricos, cuenta con la separación de los datos en diferentes subconjuntos de prueba (test) o de entrenamiento (train) [7]. Se configuró para que el 70% de las muestras fuera al subconjunto de *train* y el 30% restante al subconjunto de *test*. Para asegurar que se tenga suficiente información de cada una de las clases, es necesario elevar el porcentaje de entrenamiento para aumentar las probabilidades de que el algoritmo aprenda de las tres clases definidas ya que, en nuestro caso, la clase “Alta” cuenta con pocas muestras.

5.4. Selección definitiva de las características

Para solventar el desequilibrio de la base de datos debido al elevado número de características que queríamos evaluar en comparación con el número de muestras, se redujeron las 22 características en 9: espesor del diapasón, espesor del puente, ancho inferior de la caja, altura del puente, ancho superior de la caja, largo de la efe, y las diferencias de nivel de los primeros cinco armónicos con respecto a la frecuencia fundamental.

Esta reducción del número de características se hizo gracias a la herramienta [9] que nos ayudó a conocer qué características no son prioritarias para el modelo cuando va a tomar una decisión y, por tanto, debían quedar fuera. De esta manera, reducimos un posible sobreajuste, mejoramos la

precisión del algoritmo al estar la base de datos mejor balanceada en cuanto al número de muestras frente al número de características reduciendo así el tiempo de entrenamiento.

6. RESULTADOS

Una vez finalizadas las etapas de definición y de ajuste de la base de datos, se procede a probar su efectividad con los dos algoritmos seleccionados, obteniendo en las métricas evaluadas una variabilidad elevada. Esto es debido a la falta de muestras de la clase “alta” en la base de datos que provoca que el modelo quede desajustado en la definición de la clasificación.

Para garantizar la independencia de las muestras y controlar esa variabilidad, utilizamos validación cruzada para estimar el resultado final de la eficacia del algoritmo para cada una de las bases de datos que se han propuesto. Así, probamos el modelo bajo el mayor número de circunstancias posibles [7]. El resultado obtenido con esta herramienta fue que, a pesar de que la base de datos es limitada y queda desbalanceada por el número insuficiente de medidas o muestras en todas las clases, el algoritmo basado en árboles de decisión funciona bien en estos casos (ver Figura 10).

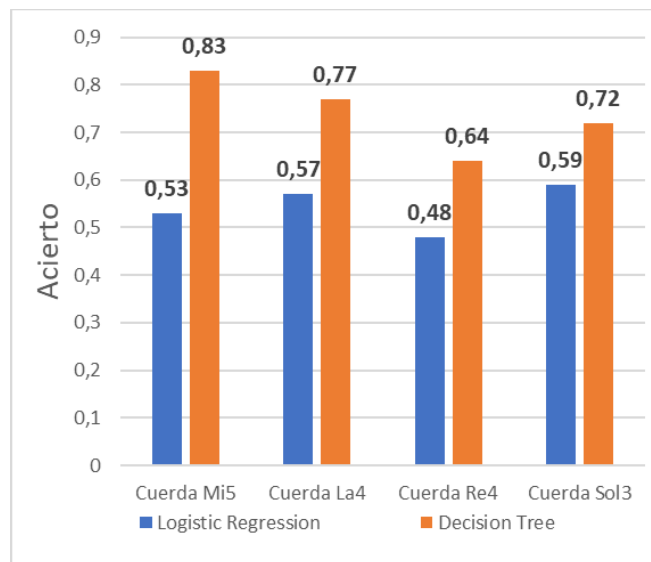


Figura 10. Resultados de acierto con la métrica *accuracy* con los diferentes modelos.

7. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el estudio de 19 violines con el objetivo de relacionar las características de los aspectos constructivos y las capacidades vibratorias del instrumento, propiedades necesarias e importantes para determinar la calidad del instrumento. Tras conocer las dimensiones físicas de cada uno de los violines, la marca de las cuerdas utilizadas, su precio en el mercado, realizar las medidas de vibración de las tapas de los violines con un acelerómetro y relacionar todas

estas características gracias a los algoritmos ofrecidos por *Scikit-Learn* de *machine learning* se ha llegado a la conclusión de que no existe un solo elemento en concreto que determine el precio del violín. También que no todas las características son determinantes, de hecho, de las 22 que se plantearon al inicio, solo han sido útiles 9 para el algoritmo. Esto nos lleva a plantearnos que hay más variables que no han sido evaluadas como, por ejemplo, el volumen del violín, el diámetro del alma o el material de construcción, que podrían tenerse en cuenta en futuras actualizaciones del algoritmo.

Además, el número de violines estudiados, pese a tener una gran variedad de calidades, ha sido la principal limitación ya que no es fácil encontrar violines con una clasificación alta que ayuden a completar una base de datos más robusta en cuanto a muestras se refiere.

En cuanto a la extracción de características de las mediciones, el porcentaje de la diferencia del nivel de aceleración entre los armónicos y la frecuencia fundamental ha sido la elegida por no ser influenciada por agentes externos como el uso de diferente velocidad y presión del arco sobre las cuerdas, acción muy complicada de controlar.

Por todo esto, esta herramienta puede ser el inicio del cambio en la estimación o peritaje del precio de los violines teniendo en cuenta no sólo quién lo construyó, sino también las características físicas o la distribución frecuencial del sonido emitido.

8. REFERENCIAS

- [1] C. Manton. *Manual de medidas Acústicas y Control de Ruido*, MacGraw-Hill, Madrid, España, 1995
- [2] J. Allday, and S. Adams, *Advanced Physics*, Oxford, 2000.
- [3] J. Woodhouse. *The acoustics of the violin: a review*, IOP Science Vol.77, n11, 2014.
- [4] C. Raman, *On the mechanical theory of vibrations of bowed strings*. Bulletin of the Indian Association for the Cultivation of Science, 15: 1-158, 1918.
- [5] N. Berni Martín. Violín-Barcelona. Obtenido de <http://violin-barcelona.blogspot.com/2012/05/terminología.html>
- [6] PCB Piezotronics. Obtenido de <https://www.pcb.com/products?m=352C33>
- [7] "Scikit-Learn Preprocessing-OneHotEncoder". Obtenido de <https://lc.cx/zSGvFN>
- [8] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani. *An introduction to Statistical Learning*, Springer, New York, EEUU, 2023.
- [9] Aprende Machine Learning. Obtenido de <https://lc.cx/dgmk0p>