

Reconocimiento automático de notas del piano

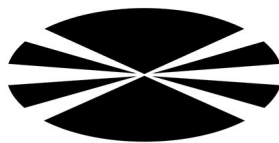
David Rodríguez Bacelar

Kevin Millán Canchapoma

Luca D'angelo Sabín

Jorge Hermo González

26 de abril de 2022



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Índice

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 1. Glosario | 3 |
| 2. Introducción | 3 |
| 3. Descripción del problema | 4 |
| 3.1. Restricciones | 4 |
| 3.2. Características | 5 |
| 4. Análisis bibliográfico | 6 |
| 5. Desarrollo | 8 |
| 5.1. Primera aproximación | 8 |
| 5.1.1. Descripción | 8 |
| 5.1.2. Resultados | 11 |
| 5.1.3. Discusión | 13 |
| 5.2. Segunda aproximación | 16 |
| 5.2.1. Resultados | 18 |
| 5.2.2. Discusión | 22 |
| 5.3. Tercera aproximación | 23 |
| 5.3.1. Resultados | 29 |
| 5.3.2. Discusión | 32 |
| 6. Conclusiones | 33 |
| 7. Trabajo futuro | 33 |
| 8. Bibliografía | 33 |

1. Glosario

- Sample: muestra de carácter musical
- Cover: Reinterpretación de una canción por parte de alguien diferente al que la compuso.
- VP: Verdadero positivo
- VN: Verdadero negativo
- FP: Falso positivo
- FN: Falso negativo
- RNA: Red de neuronas artificial.
- SVM: *Support Vector Machine* (Máquina de soporte vectorial).
- kNN: *K-nearest neighbors* (k vecinos más cercanos).
- poly: *Kernel* polinomial.
- rbf: *Kernel* de función de base radial (Gaussiano)
- sigmoid: *Kernel* sigmoidal

2. Introducción

A raíz de la pandemia, el aumento del interés por el aprendizaje en diferentes ámbitos llegó también a la música, y con él, la aparición de herramientas para aprender a tocar diferentes instrumentos de forma autodidacta.

Así, para cualquiera que esté aprendiendo, el escuchar una canción que te gusta e intentar tocarla es algo que acaba siendo un proceso frustrante y que requiere una gran cantidad de horas intentando sacar las notas que la componen.

Nuestro sistema se encargaría entonces de reconocer y diferenciar a partir de audios las notas de una pieza de piano pudiendo, en un futuro, ser capaz de detectar acordes y tonalidades, siendo útil en aplicaciones como Spotify, Tidal... Para ello, haremos uso de diferentes técnicas de aprendizaje automático como las redes de neuronas artificiales, árboles de decisión y máquinas de soporte vectorial, comparando su rendimiento y eligiendo la que mejor resultados nos ofrezca.

A lo largo de esta memoria analizaremos a fondo el problema a resolver en la Sección 3, desarrollaremos las diferentes soluciones en la Sección 5, hablaremos sobre las conclusiones del trabajo en la Sección 6 y finalizaremos comentando las aplicaciones al mundo real en la Sección 7. También se podrá consultar la bibliografía utilizada en la Sección 4 y 8.

3. Descripción del problema

Nuestro sistema se centrará en reconocer, a partir de un audio, la nota del piano que se está tocando. Escogimos este instrumento por la cantidad de recursos que podemos encontrar y por su naturaleza invariable al ser tocada por una u otra persona.

Dada la naturaleza de nuestro sistema, descartamos utilizar la especificidad o la sensibilidad ya que nos es indiferente las clases en las que se clasifiquen las notas (el coste de un falso positivo o un falso negativo es el mismo).

Así, como solo nos interesa una correcta clasificación global, pensamos en utilizar la precisión, la cual sigue la fórmula:

$$Precision = \frac{VN + VP}{(VN + FN + VP + FP)} \quad (1)$$

El inconveniente de esta métrica está en que si tenemos un conjunto de patrones desbalanceado (gran diferencia en el número de patrones positivos y negativos), la precisión podría alcanzar valores muy altos con sistemas que clasifiquen todos los patrones en la clase con mayor número de ellos en el entrenamiento.

La métrica que utilizaremos entonces para valorar los resultados obtenidos y que paila los problemas mencionados anteriormente será la **F1-score**. Esta se corresponde con la media armónica de la sensibilidad y el valor predictivo positivo y está caracterizada por la fórmula:

$$F1 - Score = \left(\frac{Sensibilidad^{-1} + VPP^{-1}}{2} \right)^{-1} \quad (2)$$

donde,

$$Sensibilidad = \frac{VP}{(FN + VP)} \quad (3)$$

$$VPP = \frac{VP}{(VP + FP)}, \quad (4)$$

Quizá el único inconveniente de esta métrica es su difícil interpretación, más allá de comparar los valores que ofrecen diferentes sistemas. El valor más alto que puede alcanzar es de 1 (todos los patrones se clasificaron correctamente) y el más bajo es de 0 (todos los patrones se clasificaron incorrectamente). Entonces, para facilitar la interpretación de la métrica, también se mostrará la precisión de cada modelo, pero se utilizará el F1-Score para determinar el mejor modelo.

3.1. Restricciones

Como única restricción, en dicho audio solo puede haber una nota sonando a la vez para que el sistema sea capaz de reconocerla correctamente.

3.2. Características

La base de datos con la que contamos tiene un total de 5.406 audios con una media de más de 50 *samples* por cada una de las 85 notas del piano (a partir de *C1*), tocadas desde posiciones e intensidades distintas y grabadas con micrófonos diferentes. Dichos *samples* están en formato *.wav* en estéreo, con un *bitrate* de *2304kbps*, *24 bits per sample* y un *sample rate* de *48kHz*. Todo ello ocupa un total de *34.5GB* en disco. La duración media de los *samples* es de aproximadamente 6 segundos.

Se puede ver un ejemplo del espectrograma de una de las *samples* que vamos a utilizar en la figura ??

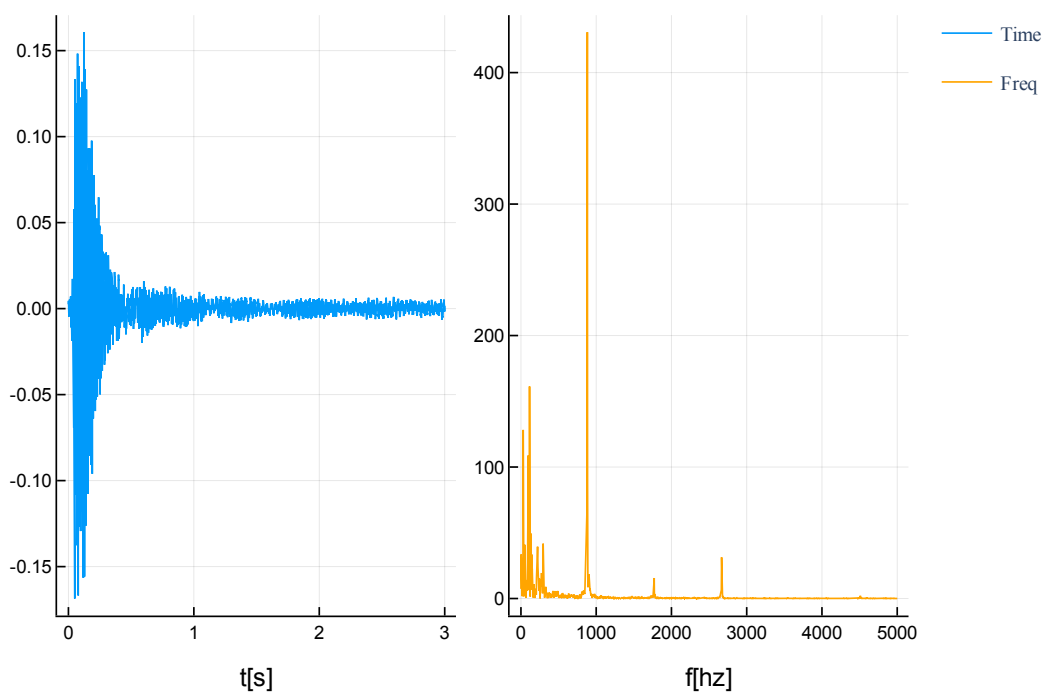


Figura 1: Notas A5 en tiempo y frecuencia

El origen de la base de datos es una librería de piano de la compañía *FluffyAudio* (<https://www.fluffyaudio.com/shop/scoringpiano>) grabada en 2016 y pensada para jazz, música clásica y bandas sonoras.

4. Análisis bibliográfico

Para profundizar en el tema antes de abordarlo, en esta sección se analizan diferentes artículos científicos relacionados con la inteligencia artificial y el reconocimiento de audio, ya sea específicamente relacionado o no con el mundo del reconocimiento de piezas o notas musicales.

Trabajos como el de Osmalsky y col., 2012 nos aportan nuevos enfoques, en el que, en lugar de detectar las notas por separado, analizan todo el espectro de frecuencias para poder reconocer acordes completos de diferentes instrumentos; utilizan una técnica llamada Pitch Class Profile (PCP), que obtiene las relaciones energéticas de cada nota en la escala a partir de un audio.

Además, como resumen Benetos y col., 2018, a pesar del estado avanzado de la transcripción automática de canciones, aún están presentes retos tales como la independencia de los instrumentos, de los estilos musicales o la interpretación de la expresividad.

Otros trabajos mas antiguos como los de Foo y Wong, 1999, describen un algoritmo capaz de reconocer notas de un piano a partir de piezas sintetizadas o acústicas, que son digitalmente muestreadas y transformadas al dominio de frecuencia usando la transformada de Q constante a partir de la cual se la aplican diferentes técnicas para identificar las notas.

En un terreno más general, trabajos como el de Chang y col., 2017, exploran la identificación de *covers* utilizando estructuras más novedosas que no desarrollaremos en este trabajo como son las Redes de Neuronas Convolucionales. Las salidas de este sistema corresponderían con la probabilidad de ser una *cover* (comparándola con la canción original), y se ordenarían por dicha probabilidad elaborando un ranking.

También encontramos la tesis de Klapuri, 2004 que propone un sistema capaz de generar una representación simbólica a partir de un audio, centrándose en el desarrollo de los algoritmos que pueden ser usados para detectar y observar sonidos harmónicos en señales polifónicas. Los cuales fueron evaluados aplicandolos en un programa de transcripción de música para piano implementado y simulado en un entorno Matlab.

En el trabajo de Marolt y col., 2002 destacamos el uso de sistemas conexionistas para la detección de inicio en señales musicales basandose en la combinacion de un banco de filtros auditivos , un red neuronal pulsante y un perceptron multicapa. Este uso de sistemas conexionistas también es empleado para sistemas de transcripción de musica de piano polifónico, mostrando ciertas ventajas sobre otros métodos debido a su estructura y presentándose como una alternativa viable a los algoritmos ya existentes

El uso de redes de neuronas artificiales también están presentes en trabajos como Solanki y Pandey, 2019, que aborda la identificación de los instrumentos que forman parte de piezas polifónicas. Utiliza una red de neuronas convolucional de 8 capas y se apoya en los espectrogramas MEL para mapear datos del audio.

Para finalizar, ya en un campo algo más alejado del musical, podemos destacar el trabajo elaborado por Baevski y col., 2021, el cual profundiza en el campo de reconocimiento del habla mediante inteligencia artificial. A diferencia de otros sistemas de reconocimiento, este trabajo no usa datos etiquetados que limiten el reconocimiento a un grupo reducido de idiomas. Esta técnica necesita menos requerimientos, aprovechando representaciones auto supervisadas del habla para segmentar el audio y aprender a mapear desde estas representaciones a fonemas via *Adversarial Training*.

5. Desarrollo

Para el desarrollo de este sistema utilizaremos un método basado en aproximaciones, es decir, comenzaremos acotando el problema e iremos aumentando la complejidad a medida que obtenemos resultados satisfactorios.

5.1. Primera aproximación

5.1.1. Descripción

En esta primera aproximación nos limitaremos a diferenciar únicamente entre dos notas. Escogimos las notas $C4$ y $A5$ de los cuales usaremos 92 y 56 audios de cada una, respectivamente, en total se utilizarán 148 patrones. En las figuras 2a y 2b podemos ver a la izquierda la señal en tiempo y y, a la derecha, la señal en el dominio de la frecuencia.

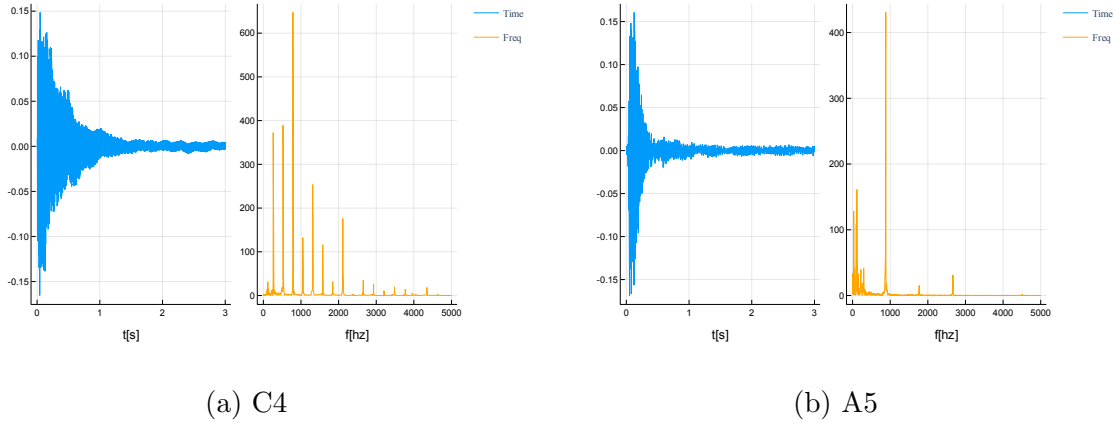


Figura 2: Notas en tiempo y frecuencia

Dado que cada muestra tiene una duración diferente, decidimos quedarnos solo con los 3 primeros segundos de cada audio (que es donde está la información más relevante de la nota) y, para la frecuencia, acotaremos cada señal entre 0 y 5000 Hz. Ya que la frecuencia máxima que se alcanza en el piano clásico es de 4186 Hz ($C8$) y la más baja, en nuestra base de datos, es de 32.7Hz ($C1$), escogimos un rango de frecuencias ampliado debido a que es posible que exista información que nos ayude a identificar la nota.

Para los experimentos, se va a realizar ***cross-validation*** con cada modelo, para así poder evaluar el rendimiento de cada uno, con independencia de la aleatoriedad que se pueda producir al seleccionar un subconjunto de patrones para test. En concreto, se realizará un ***cross-validation*** con **10 folds**. El valor del F1-Score y de la precisión del modelo será el promedio de dichos valores obtenidos en los *folds*.

Además, como las notas de un mismo instrumento se diferencian principalmente por la frecuencia (una nota más aguda tiene una mayor frecuencia y una más grave, una

menor), calcularemos de las señales en el dominio del tiempo su relación en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada de Fourier y, posteriormente, extraeremos las siguientes características:

- **Energía media de la señal:** ya que las señales con más frecuencia (más agudas) tienen más energía, esta característica nos podría ayudar a diferenciar entre notas tocadas con la misma intensidad.
- **Media, desviación típica, y valor máximo de la intensidad en el dominio de la frecuencia, en intervalos no uniformes:** la frecuencia de cada nota aumenta de forma exponencial siguiendo la fórmula:

$$f_{i+1} = f_i \cdot (\sqrt[12]{2}), f_0 = 27,5Hz \quad (5)$$

Por ello decidimos dividir el espectro en **10 intervalos** de longitud variable siguiendo dicha distribución. Podríamos entonces obtener un intervalo donde la media y la desviación típica de la frecuencia fueran más elevados que el resto, ayudándonos a identificar la nota.

Los intervalos que usaremos son los siguientes:

$(0.0, 380.3)$, $(380.3, 783.21)$, $(783.21, 1210.08)$, $(1210.08, 1662.33)$, $(1662.33, 2141.47)$, $(2141.47, 2649.11)$, $(2649.11, 3186.93)$, $(3186.93, 3756.73)$, $(3756.73, 4360.42)$ y $(4360.42, 5000.0)$

- **Zero-crossing/s:** esta característica determina las veces que la señal, en el dominio del tiempo, toma el valor 0 por segundo. Como dicha característica nos proporcionaría valores similares a la frecuencia media de la señal, podría contribuir a su correcta clasificación.

En lo referente al preprocesado de los datos, hemos decidido optar por una **normalización de media cero**, debido a que los datos no están acotados en un intervalo y pueden tomar cualquier valor, ya sea en tiempo o en frecuencia. Aunque las frecuencias de las notas sí que están acotadas en un intervalo, en la señal puede haber ruido que sobrepase los valores típicos, por lo que una normalización entre mínimo y máximo no sería lo adecuado.

Así, obtuvimos para cada característica, la media y la desviación típica. Se muestran dichos datos en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de normalización para cada característica

| Característica | Media | Desviación Típica |
|-------------------|--------------|-------------------|
| E | 0,0045678928 | 0,0035726614 |
| zero-crossing | 1797,2139 | 1352,7441 |
| m ₁ | 16,821161 | 11,616611 |
| m ₂ | 9,4079 | 5,8349323 |
| m ₃ | 14,607474 | 11,515968 |
| m ₄ | 3,8720663 | 3,5469663 |
| m ₅ | 2,3520973 | 2,1539617 |
| m ₆ | 0,48698702 | 0,6487291 |
| m ₇ | 0,7153551 | 1,0973071 |
| m ₈ | 0,40077275 | 0,500489 |
| m ₉ | 0,22367951 | 0,3412378 |
| m ₁₀ | 0,23234393 | 0,5112222 |
| std ₁ | 54,282375 | 46,679535 |
| std ₂ | 31,582827 | 27,185955 |
| std ₃ | 57,896194 | 38,439426 |
| std ₄ | 11,108885 | 12,696077 |
| std ₅ | 7,0041313 | 6,732649 |
| std ₆ | 0,52131796 | 0,72755563 |
| std ₇ | 2,7318008 | 4,6750984 |
| std ₈ | 0,9234557 | 1,2807367 |
| std ₉ | 0,47755784 | 0,89846444 |
| std ₁₀ | 0,5695597 | 1,2890217 |
| max ₁ | 832,8222 | 779,30615 |
| max ₂ | 567,7255 | 505,1785 |
| max ₃ | 901,9232 | 548,2265 |
| max ₄ | 192,80989 | 237,47154 |
| max ₅ | 98,938354 | 103,55783 |
| max ₆ | 4,392064 | 6,0777674 |
| max ₇ | 40,596066 | 65,99385 |
| max ₈ | 11,672165 | 15,524432 |
| max ₉ | 5,7904434 | 10,440257 |
| max ₁₀ | 5,6131926 | 11,565159 |

Donde:

- E indica la **energía de la señal**.
- m_i indica la **media de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- std_i indica la **desviación típica de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- max_i indica el **máximo de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.

Se van a realizar experimentos sobre los siguientes modelos: RNA, SVM, Árboles de decisión y kNN.

Además, como el entrenamiento de una RNA es un proceso no determinista, en cada *fold* tendremos que entrenar la RNA varias veces, y promediar los resultados. Para estos experimentos, se ha repetido 30 veces el entrenamiento de la RNA en cada *fold*, devolviendo el resultado promedio de esas 30 ejecuciones.

Para poder evaluar el modelo con mejor rendimiento, como ya se ha dicho antes, utilizaremos como medida el promedio del **F1-Score** en los *folds*. Si hay empate en dicha media, se elegirá el modelo con menor desviación típica de la métrica.

5.1.2. Resultados

Para permitir la reproducibilidad de los experimentos, se utilizó 100 como semilla de generación de números aleatorios.

5.1.2.1 RNA

Para el entrenamiento de las RNA, se han utilizado los siguientes parámetros en común:

- Ratio de aprendizaje: 0,01
- Ratio de patrones para el conjunto de validación: 0,2.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento: 1500.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento sin mejorar el error de validación: 5.
- Algoritmo de optimización: ADAM.
- Función de *loss*: *Binary Cross Entropy*.

El hiperparámetro que hemos variado ha sido la arquitectura de neuronas a utilizar. Utilizamos 8 arquitecturas distintas, donde la arquitectura $[i]$ denota una RNA con una única capa oculta con i neuronas y la arquitectura $[i, j]$ denota una neurona con dos capas ocultas; con i neuronas en la primera capa oculta y j neuronas en la segunda capa oculta.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 2

5.1.2.2 SVM

Para las máquinas de soporte vectorial hemos utilizado 8 configuraciones distintas de los hiperparámetros de *kernel*, grado del *kernel* (sólo se utiliza en *kernel* polinomial), *gamma* y C .

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 3

Tabla 2: Resultados RRNNA

| Arquitectura | F1-Score | Precisión |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| [2] | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| [4] | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| [8] | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| [2, 4] | $0,9119 \pm 0,12531$ | $0,96487 \pm 0,05054$ |
| [2, 8] | $0,90667 \pm 0,14724$ | $0,96524 \pm 0,05412$ |
| [4, 2] | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| [4, 4] | $0,99 \pm 0,0225$ | $0,99643 \pm 0,00804$ |
| [4, 8] | $0,9621 \pm 0,0974$ | $0,97934 \pm 0,05699$ |

Tabla 3: Resultados SVM

| (kernel, grado, gamma, C) | F1-Score | Precisión |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| (poly, 3, 1, 1) | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| (rbf, 3, 1, 1) | $0,93642 \pm 0,07368$ | $0,94119 \pm 0,07166$ |
| (sigmoid, 3, 1, 1) | $0,71875 \pm 0,15823$ | $0,77143 \pm 0,11289$ |
| (poly, 5, 10, 0,1) | $0,99 \pm 0,03162$ | $0,98571 \pm 0,04518$ |
| (rbf, 3, 10, 0,1) | $0,76689 \pm 0,01542$ | $0,62214 \pm 0,02026$ |
| (sigmoid, 3, 10, 0,1) | $0,70059 \pm 0,1406$ | $0,77768 \pm 0,06262$ |
| (rbf, 3, 0,01, 100) | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| (rbf, 3, 100, 0,01) | $0,76689 \pm 0,01542$ | $0,62214 \pm 0,02026$ |

5.1.2.3 Árboles de decisión

Para los árboles de decisión hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de profundidad máxima.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 4

Tabla 4: Resultados Árbol de decisión

| Altura máxima | F1-Score | Precisión |
|---------------|---------------|---------------|
| 2 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 4 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 8 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 16 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 32 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 64 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |

5.1.2.4 kNN

Para el modelo kNN hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de k (número de vecinos más cercanos).

Se muestran los resultados de la experimentación en la tabla 5

Tabla 5: Resultados kNN

| K | F1-Score | Precisión |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 2 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 3 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 5 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 8 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 13 | $1,0 \pm 0,0$ | $1,0 \pm 0,0$ |
| 21 | $0,99091 \pm 0,02875$ | $0,99286 \pm 0,02259$ |

5.1.3. Discusión

Los resultados han sido muy buenos, ya que en la mayoría de casos se alcanza una **precisión** y un **F1-Score** del 100 % o muy alto.

En general, los sistemas se equivocan en muy pocos patrones. Esto se puede deber a que el problema elegido en esta aproximación era excesivamente sencillo para el elevado número de características escogidas, permitiéndonos separar perfectamente los patrones en las dos clases.

En lo referente a las características, por una parte estas han sido correctamente elegidas, ya que alcanzamos una precisión muy alta. Pero por otra parte, el hecho de que algunos sistemas concretos no funcionen tan bien (por ejemplo, algunos SVM), se podría deber al elevado número de características, ya que algunas de ellas pueden ser innecesarias o hasta contraproducentes en este sencillo problema. Una buena estrategia sería el intentar reducir el número de características en futuras aproximaciones, pero hay que tener cuidado, ya que si aumentamos el número de clases, podría darse el caso de haber eliminado una característica necesaria para una correcta clasificación.

En concreto, las características que creemos que son las que producen mejores resultados son las que se refieren a los intervalos en frecuencia de $(0.0, 380.3)$ y $(783.21, 1210.08)$, debido a que es en ellos donde se sitúan las frecuencias de las notas $C4$ y $A5$, respectivamente. Las características que se corresponden a dichos intervalos son m_1 , std_1 , max_1 para el primer intervalo y m_3 , std_3 , max_3 para el segundo intervalo.

Otra característica que podría funcionar sería la frecuencia en la que se alcanza el pico absoluto en intensidad de la señal, o la media de las K frecuencias con mayor intensidad, sin tener en cuenta la división en intervalos. También se podría aumentar el número de intervalos en los que obtener las características, para poder así separar mejor las notas con frecuencias más cercanas.

Todos los algoritmos tienen al menos una configuración con un **F1-Score** de $1,0 \pm 0,0$, por lo que es complicado encontrar uno que sea el mejor.

Podemos destacar la RNA con una arquitectura de una única capa oculta con 2 neuronas, ya que es un modelo muy sencillo y podemos esperar que, cuanto más sencillo sea un modelo, mayor será también su capacidad de generalización.

En la Figura 3 podemos ver un gráfico del entrenamiento de dicha RNA, donde observamos el error cometido en los conjuntos de test, validación y entrenamiento para cada ciclo de entrenamiento. Este se ha realizado utilizando todos los patrones, separando un 20 % para el conjunto de test. Además, se puede ver que se ha producido una parada temprana, ya que el sistema no ha realizado el máximo número de ciclos de entrenamiento (1500 ciclos) y se puede distinguir también como la curva de la gráfica desciende muy rápido. Esto se puede deber a que tenemos un ratio de aprendizaje alto para este problema concreto.

En la Tabla 6 podemos ver una matriz de confusión para la RNA entrenada anteriormente. Las predicciones se hicieron sobre un conjunto de test que supone un 20 % de todos los patrones utilizados. El 80 % de los patrones restantes se utilizó para el entrenamiento de la RNA, ya que el conjunto de entrenamiento no se debería utilizar para realizar predicciones.

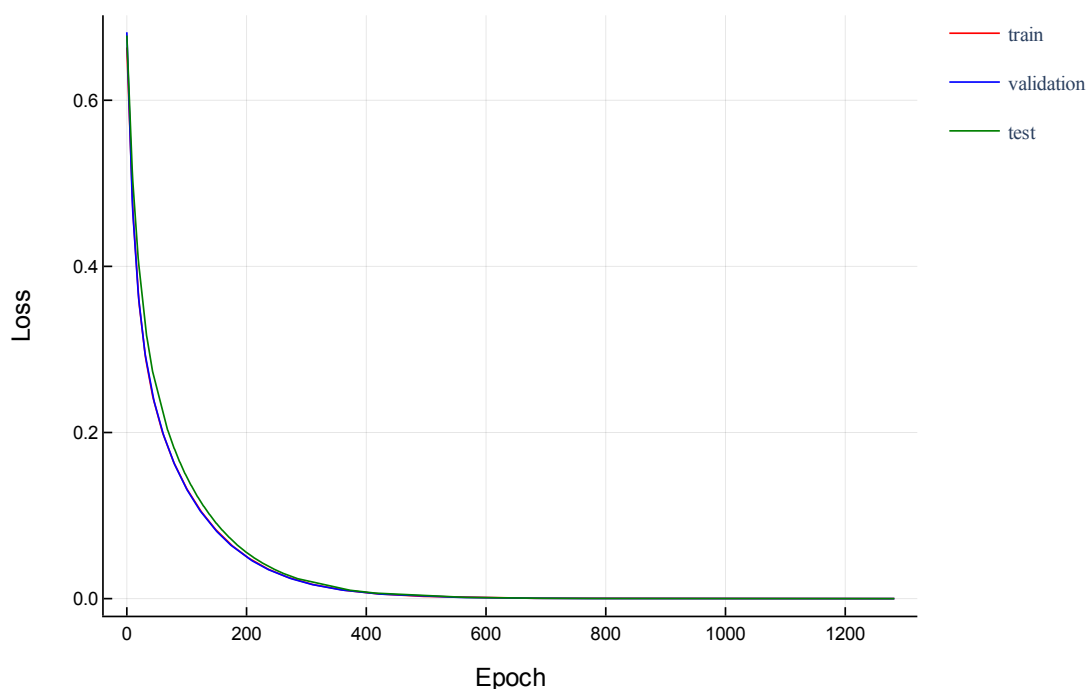


Figura 3: Entrenamiento RNA

| | | Predicc. | |
|------|----|----------|----|
| | | A5 | C4 |
| Real | A5 | 15 | 0 |
| | C4 | 0 | 15 |

Tabla 6: Matriz de confusión RNA

Pero aunque se alcance ya un buen resultado con un modelo sencillo como puede ser la RNA anterior, caben destacar los árboles de decisión, que son modelos que pueden ofrecer explicabilidad sobre sus predicciones, además de presentar un entrenamiento determinista, por lo que si tenemos que elegir el mejor modelo, nos decantaríamos por este (en concreto, el de altura máxima de 2, ya que es el más sencillo), ya que presenta también un 100 % de **F1-Score**.

Aunque si deseamos un modelo con una base matemática más fuerte, en vez de un modelo con una base estadística como puede ser un árbol de regresión, utilizar una máquina de soporte vectorial con un *kernel* polinomial de grado 3, y ambos valores de *gamma* y *C* de 1, también sería una buena opción.

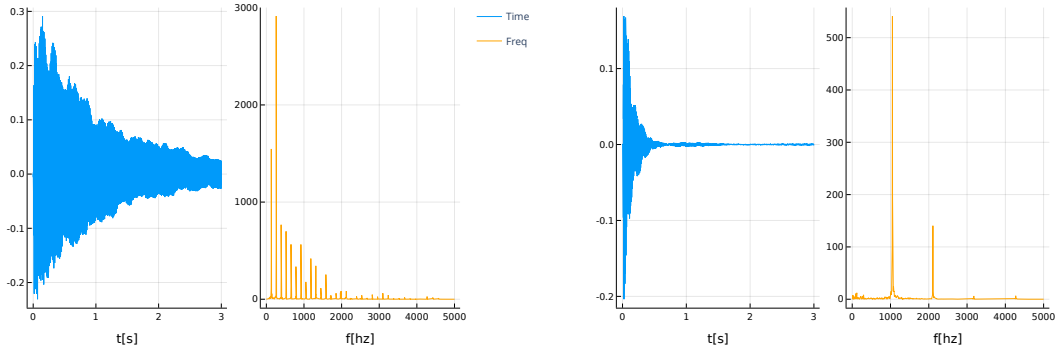
Los algoritmos que han funcionado peor han sido ciertas configuraciones de los SVM, en concreto las que utilizan un *kernel* sigmoidal. Entonces, utilizar un *kernel* sigmoidal no parece ofrecer buenos resultados para estos patrones.

5.2. Segunda aproximación

Como hemos obtenido resultados muy buenos en la aproximación anterior, se va a aumentar la complejidad del problema, es decir, añadiremos más notas a ser clasificadas. Se clasificarán entonces 15 notas, y se dispondrá de 1090 patrones para ser utilizados por el sistema.

Las notas que vamos a clasificar son: $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $C5$, $C6$, $C7$, $C8$, $A1$, $A2$, $A3$, $A4$, $A5$, $A6$ y $A7$.

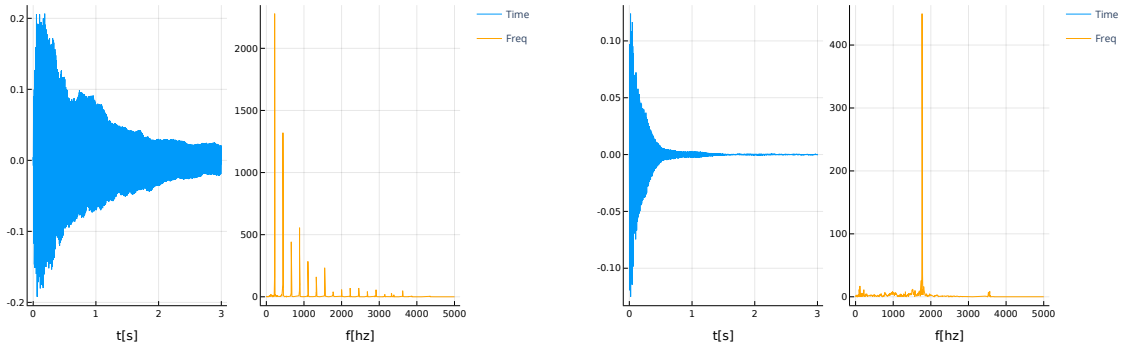
Se puede ver algunos ejemplos de los samples que vamos a utilizar, con su señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, en las figuras 4a, 4b, 5a y 5b.



(a) C3

(b) A6

Figura 4



(a) A3

(b) A6

Figura 5

Como hemos aumentado mucho el número de clases a clasificar, aumentaremos también el número de características para poder diferenciar bien las clases que sean más similares.

En concreto, añadiremos las siguientes características:

- **Frecuencia a la que se alcanza el máximo de intensidad de la señal en frecuencia** en cada uno de los 10 intervalos que ya se especificaron en la aproximación anterior.

No se producen cambios sobre las características que fueron incorporadas en la aproximación anterior.

Para el preprocesado de los datos, utilizaremos, como se mencionó en la aproximación anterior, una normalización de media cero. Así, obtuvimos para cada característica, la media y la desviación típica. Se muestran dichos datos en las tablas 7 y 8.

Donde:

- E indica la **energía de la señal**.
- m_i indica la **media de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- std_i indica la **desviación típica de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- max_i indica el **máximo de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- $max-freq_i$ indica la **frecuencia donde se alcanza el máximo de intensidad** en el intervalo i en frecuencia.

Para estos experimentos se ha repetido 20 veces el entrenamiento de la RNA en cada *fold*, devolviendo el resultado promedio de esas 20 ejecuciones.

Para poder evaluar el modelo con mejor rendimiento, como ya se ha dicho antes, utilizaremos como medida el promedio del **F1-Score** en los *folds*. Si hay empate en dicha media, se elegirá el modelo con menor desviación típica de la métrica.

Tabla 7: Parámetros de normalización (I)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|-------------------|--------------|-------------------|
| E | 0,0050883736 | 0,0088912 |
| zero-crossing | 3743,606 | 5035,344 |
| m ₁ | 15,578591 | 18,397396 |
| m ₂ | 11,147778 | 9,179351 |
| m ₃ | 9,6564455 | 9,295277 |
| m ₄ | 4,0943613 | 4,225765 |
| m ₅ | 3,6645029 | 4,699565 |
| m ₆ | 1,0346977 | 1,3888823 |
| m ₇ | 0,71540374 | 1,0062366 |
| m ₈ | 0,68384236 | 1,307346 |
| m ₉ | 0,38978294 | 0,8350492 |
| m ₁₀ | 0,44757652 | 1,4078437 |
| std ₁ | 49,61187 | 74,658005 |
| std ₂ | 39,12518 | 41,206196 |
| std ₃ | 29,023785 | 34,23634 |
| std ₄ | 8,560635 | 11,001557 |
| std ₅ | 9,463276 | 12,920476 |
| std ₆ | 1,5626754 | 2,6529887 |
| std ₇ | 1,6301519 | 2,8170295 |
| std ₈ | 1,2500806 | 2,295387 |
| std ₉ | 0,5342404 | 0,98041487 |
| std ₁₀ | 0,7347808 | 2,2108128 |
| max ₁ | 944,37256 | 1596,2578 |
| max ₂ | 748,07245 | 844,44037 |
| max ₃ | 442,8393 | 524,42633 |
| max ₄ | 130,52594 | 192,10622 |
| max ₅ | 129,60143 | 179,40135 |
| max ₆ | 19,159048 | 36,38486 |
| max ₇ | 22,589241 | 40,29418 |
| max ₈ | 13,267355 | 21,899231 |
| max ₉ | 5,3473926 | 10,327133 |
| max ₁₀ | 5,520794 | 13,594501 |

5.2.1. Resultados

Para permitir la reproducibilidad de los experimentos, se utilizó *100* como semilla de generación de números aleatorios.

Tabla 8: Parámetros de normalización (II)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|------------------------|-----------|-------------------|
| max-freq ₁ | 174,89925 | 87,058235 |
| max-freq ₂ | 521,6259 | 125,11409 |
| max-freq ₃ | 961,683 | 100,904564 |
| max-freq ₄ | 1394,9509 | 126,07898 |
| max-freq ₅ | 1897,9567 | 174,84656 |
| max-freq ₆ | 2353,7712 | 191,61922 |
| max-freq ₇ | 2791,1377 | 166,82562 |
| max-freq ₈ | 3426,2026 | 169,13255 |
| max-freq ₉ | 4093,2415 | 226,97453 |
| max-freq ₁₀ | 4583,3877 | 193,1689 |

5.2.1.1 RNA

Para el entrenamiento de las RNA, se han utilizado los siguientes parámetros en común:

- Ratio de aprendizaje: 0,01
- Ratio de patrones para el conjunto de validación: 0,2.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento: 1500.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento sin mejorar el error de validación: 5.
- Algoritmo de optimización: ADAM.
- Función de *loss*: *Cross Entropy*.

El hiperparámetro que hemos variado ha sido la arquitectura de neuronas a utilizar. Utilizamos 8 arquitecturas distintas, donde la arquitectura $[i]$ denota una RNA con una única capa oculta con i neuronas y la arquitectura $[i, j]$ denota una neurona con dos capas ocultas; con i neuronas en la primera capa oculta y j neuronas en la segunda capa oculta.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 9

5.2.1.2 SVM

Para las máquinas de soporte vectorial hemos utilizado 8 configuraciones distintas de los hiperparámetros de *kernel*, grado del *kernel* (sólo se utiliza en *kernel* polinomial), *gamma* y *C*.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 10

Tabla 9: Resultados RNA

| Arquitectura | F1-Score | Precisión |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| [8] | $0,92977 \pm 0,01923$ | $0,95523 \pm 0,0131$ |
| [16] | $0,96092 \pm 0,0163$ | $0,97591 \pm 0,0112$ |
| [32] | $0,96305 \pm 0,01805$ | $0,97745 \pm 0,01137$ |
| [8, 8] | $0,87808 \pm 0,01593$ | $0,92368 \pm 0,00628$ |
| [16, 4] | $0,76012 \pm 0,03119$ | $0,8518 \pm 0,0233$ |
| [16, 8] | $0,92264 \pm 0,02515$ | $0,95168 \pm 0,01708$ |
| [32, 16] | $0,9506 \pm 0,01989$ | $0,97044 \pm 0,01033$ |
| [32, 32] | $0,95122 \pm 0,02256$ | $0,97004 \pm 0,013$ |

Tabla 10: Resultados SVM

| (kernel, grado, gamma, C) | F1-Score | Precisión |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| (poly, 3, 1, 1) | $0,97261 \pm 0,02358$ | $0,98158 \pm 0,01438$ |
| (rbf, 3, 1, 1) | $0,67559 \pm 0,04297$ | $0,69947 \pm 0,05196$ |
| (sigmoid, 3, 1, 1) | $0,28516 \pm 0,03747$ | $0,3575 \pm 0,03929$ |
| (poly, 3, 10, 0,1) | $0,97619 \pm 0,02456$ | $0,98415 \pm 0,01345$ |
| (rbf, 3, 10, 0,1) | $0,01607 \pm 0,00059$ | $0,13703 \pm 0,00568$ |
| (sigmoid, 3, 10, 0,1) | $0,23652 \pm 0,03974$ | $0,33481 \pm 0,04109$ |
| (rbf, 3, 0,01, 100) | $0,97415 \pm 0,02285$ | $0,98444 \pm 0,0122$ |
| (poly, 3, 100, 0,001) | $0,9678 \pm 0,03578$ | $0,97987 \pm 0,01547$ |

5.2.1.3 Árboles de decisión

Para los árboles de decisión hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de profundidad máxima.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 11

Tabla 11: Resultados Árbol de decisión

| Altura máxima | F1-Score | Precisión |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 4 | $0,44767 \pm 0,00668$ | $0,66703 \pm 0,01287$ |
| 8 | $0,86809 \pm 0,02258$ | $0,92653 \pm 0,01909$ |
| 16 | $0,96505 \pm 0,02104$ | $0,9725 \pm 0,0143$ |
| 32 | $0,96786 \pm 0,01849$ | $0,97302 \pm 0,01609$ |
| 64 | $0,97438 \pm 0,01244$ | $0,97779 \pm 0,0102$ |
| 128 | $0,97415 \pm 0,0161$ | $0,9779 \pm 0,01186$ |
| 256 | $0,9672 \pm 0,02388$ | $0,97452 \pm 0,0172$ |

5.2.1.4 kNN

Para el modelo kNN hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de k (número de vecinos más cercanos).

Se muestran los resultados de la experimentación en la tabla 12

Tabla 12: Resultados kNN

| K | F1-Score | Precisión |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 2 | $0,95086 \pm 0,01526$ | $0,97073 \pm 0,0088$ |
| 3 | $0,9323 \pm 0,03125$ | $0,95942 \pm 0,0156$ |
| 5 | $0,90323 \pm 0,03494$ | $0,94503 \pm 0,01712$ |
| 8 | $0,86641 \pm 0,03906$ | $0,93135 \pm 0,0199$ |
| 13 | $0,84065 \pm 0,02462$ | $0,90985 \pm 0,01911$ |
| 21 | $0,80344 \pm 0,03804$ | $0,88737 \pm 0,02667$ |

5.2.2. Discusión

En general los resultados son muy buenos, ya que hay varios modelos con un alto F1-Score. El modelo que mejor funciona es un SVM con función de *kernel* polinomial de grado 3, con un *gamma* y *C* de 10 y 0,1, respectivamente.

Este modelo tiene un F1-Score de $0,97619 \pm 0,02456$, con una precisión de $0,98415 \pm 0,01345$ en los folds. De este resultado podemos concluir que nuestro sistema funciona muy bien, ya que clasificar 15 notas es un problema relativamente complejo.

Cabe destacar modelos como una RNA con una única capa oculta de 32 neuronas; un svm con *kernel* de base radial, con los parámetros de *gamma* y *C* de 0,01 y 100, respectivamente; un árbol de decisión con altura máxima de 64; y un modelo kNN con un k de 2. Estos modelos también presentan muy buenos resultados, aunque no los mejores.

El modelo con peor rendimiento es un SVM con kernel de base radial con *gamma* y *C* de 10 y 0,1, respectivamente. Esta configuración del modelo tiene resultado increíblemente bajo (*F1-Score* de $0,01607 \pm 0,00059$), pero desconocemos a qué se puede deber.

En cuanto a las características, creemos que fue un acierto añadir la frecuencia a la que se encuentra el pico de intensidad en cada intervalo, ya que es una característica muy representativa de la señal y que sirve para diferenciar mejor las notas. Sin estas nuevas características, los resultados no serían tan buenos.

El problema que podemos observar en la matriz de confusión (Tabla 13) para el mejor sistema es que el sistema de equivoca en las notas más cercanas, como pueden ser A1, A2, C1 y C2, notas que tienen una frecuencia muy similar y se encuentran en el primer intervalo, $(0.0, 380.3)$.

Para poder diferenciar mejor entre estas notas, y entre futuras notas que puedan ser similares entre ellas, sería una buena opción que se aumentase el número de intervalos a dividir las frecuencias, para así poder diferenciar de mejor manera notas similares.

| | | Predicc. | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 |
| Real | C1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C2 | 1 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C3 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C4 | 0 | 0 | 1 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | A1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | A2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | A3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | A4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 |
| | A5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| | A6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 1 |
| | A7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 |

Tabla 13: Matriz de confusión mejor modelo

5.3. Tercera aproximación

Como hemos obtenido resultados muy buenos en la aproximación anterior, se va a aumentar la complejidad del problema, es decir, añadiremos más notas a ser clasificadas. Serán un total de 50 notas a clasificar, y se dispondrá de 3194 patrones para ser utilizados por los modelos.

Las notas que vamos a clasificar son: $C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, G1, G2, G3, G4, G5, G6$ y $G7$.

Se pueden ver algunos ejemplos de estas notas, en el dominio del tiempo y de la frecuencia, en las figuras 6a, 6b, 7a y 7b

Como en esta aproximación aumentamos mucho el número de clases a clasificar (50 clases), nos parece buena opción aumentar las características a utilizar, pero de una forma distinta a la anterior aproximación. Lo que haremos será aumentar el número de intervalos a dividir el dominio de la frecuencia; de 10 intervalos que teníamos anteriormente, a 30 intervalos. De esta manera, esperamos que se puede clasificar mejor notas que tengan frecuencias muy cercanas, además de repartir mejor el número de notas que coinciden en cada intervalos.

En concreto, los intervalos de frecuencias que utilizaremos serán los siguientes:

$(0.0, 63.845), (63.845, 131.486), (131.486, 203.149), (203.149, 279.074), (279.074, 359.513), (359.513, 444.735), (444.735, 535.025), (535.025, 630.684), (630.684, 732.032), (732.032, 839.405), (839.405, 953.163), (953.163, 1073.686), (1073.686, 1201.376), (1201.376, 1336.658), (1336.658, 1479.984), (1479.984, 1631.833), (1631.833, 1792.712), (1792.712, 1963.157), (1963.157, 2143.737), (2143.737, 2335.055), (2335.055, 2537.749), (2537.749, 2752.496), (2752.496, 2980.013), (2980.013, 3221.059), (3221.059, 3476.437),$

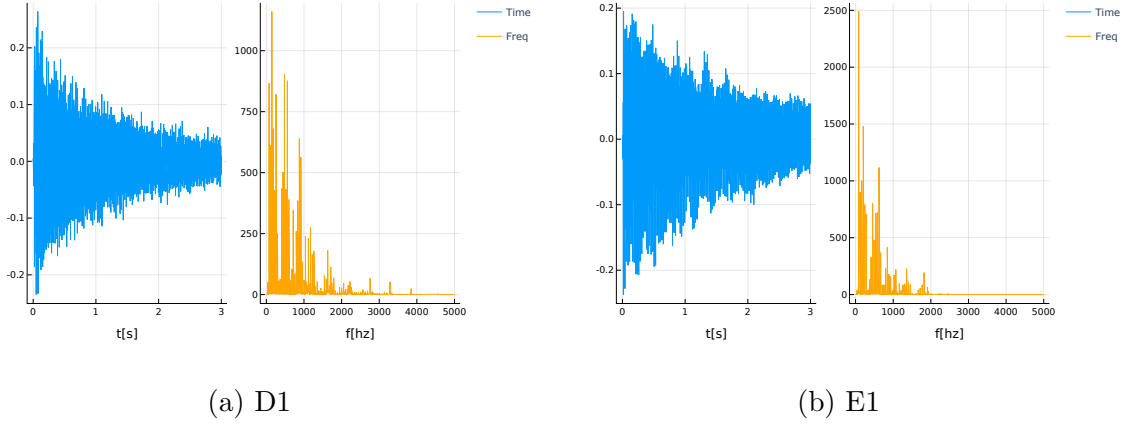


Figura 6

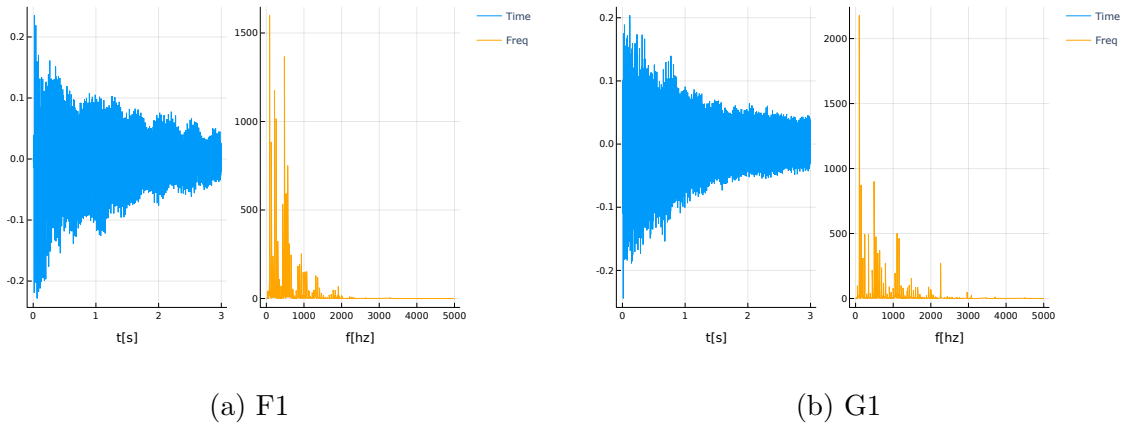


Figura 7

$(3476.437, 3747.002)$, $(3747.002, 4033.655)$, $(4033.655, 4337.353)$, $(4337.353, 4659.11)$ y $(4659.11, 5000.0)$

Para el preprocesado de los datos, utilizaremos, como se mencionó en aproximaciones anteriores, una normalización de media cero. Así, obtuvimos para cada característica, la media y la desviación típica. Se muestran dichos datos en las tablas 14, 15 16 y 17,

Donde:

- E indica la **energía de la señal**.
- m_i indica la **media de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- std_i indica la **desviación típica de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.
- max_i indica el **máximo de la intensidad** en el intervalo i en frecuencia.

Tabla 14: Parámetros de normalización (I)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|-----------------|--------------|-------------------|
| E | 0,0054126005 | 0,009019938 |
| zero-crossing | 3397,5913 | 4540,8813 |
| m ₁ | 2,5406487 | 5,2477403 |
| m ₂ | 20,31295 | 34,20369 |
| m ₃ | 18,736494 | 33,777767 |
| m ₄ | 19,506176 | 27,648252 |
| m ₅ | 17,283388 | 26,778984 |
| m ₆ | 14,071337 | 21,961533 |
| m ₇ | 15,653144 | 21,659325 |
| m ₈ | 7,2894015 | 11,942419 |
| m ₉ | 10,673911 | 22,342806 |
| m ₁₀ | 8,886631 | 17,860262 |
| m ₁₁ | 8,768464 | 14,431124 |
| m ₁₂ | 9,399654 | 13,1116905 |
| m ₁₃ | 7,141891 | 16,054686 |
| m ₁₄ | 5,671832 | 9,146762 |
| m ₁₅ | 4,4691596 | 7,688136 |
| m ₁₆ | 4,622483 | 7,50842 |
| m ₁₇ | 2,8246067 | 5,453456 |
| m ₁₈ | 2,1192815 | 3,5254076 |
| m ₁₉ | 3,2075806 | 5,558346 |
| m ₂₀ | 1,3101652 | 2,2760432 |
| m ₂₁ | 1,5997506 | 4,51931 |
| m ₂₂ | 1,4330753 | 3,7737772 |
| m ₂₃ | 0,9662523 | 2,9858894 |
| m ₂₄ | 0,79353756 | 1,8264828 |
| m ₂₅ | 0,48343834 | 0,8716932 |
| m ₂₆ | 0,6009706 | 1,4477166 |
| m ₂₇ | 0,3706837 | 0,93128383 |
| m ₂₈ | 0,41856125 | 1,3392309 |
| m ₂₉ | 0,38214317 | 1,6580197 |
| m ₃₀ | 0,13477807 | 0,25888646 |

Tabla 15: Parámetros de normalización (II)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|-------------------|------------|-------------------|
| std ₁ | 3,777772 | 9,5573845 |
| std ₂ | 43,746407 | 101,179634 |
| std ₃ | 44,765743 | 106,52451 |
| std ₄ | 44,928486 | 86,98192 |
| std ₅ | 36,79204 | 74,466835 |
| std ₆ | 34,05622 | 69,12505 |
| std ₇ | 35,642204 | 58,005997 |
| std ₈ | 14,239829 | 31,195595 |
| std ₉ | 20,148722 | 46,739002 |
| std ₁₀ | 18,305641 | 41,97697 |
| std ₁₁ | 15,096799 | 33,64003 |
| std ₁₂ | 17,944155 | 31,481377 |
| std ₁₃ | 14,973824 | 42,54836 |
| std ₁₄ | 10,101966 | 21,576153 |
| std ₁₅ | 7,4685116 | 17,61445 |
| std ₁₆ | 7,9542217 | 17,202675 |
| std ₁₇ | 5,18349 | 11,849964 |
| std ₁₈ | 2,358577 | 5,2823844 |
| std ₁₉ | 6,350091 | 12,173027 |
| std ₂₀ | 1,757622 | 4,281193 |
| std ₂₁ | 2,7778556 | 8,633124 |
| std ₂₂ | 2,4016538 | 6,636576 |
| std ₂₃ | 1,6487495 | 5,640244 |
| std ₂₄ | 1,3393545 | 3,0001454 |
| std ₂₅ | 0,606615 | 1,4506007 |
| std ₂₆ | 0,9203455 | 2,2596686 |
| std ₂₇ | 0,4674074 | 1,0911392 |
| std ₂₈ | 0,64302534 | 2,1712365 |
| std ₂₉ | 0,45122066 | 1,628174 |
| std ₃₀ | 0,19327588 | 0,4538704 |

Tabla 16: Parámetros de normalización (III)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|-------------------|-----------|-------------------|
| max ₁ | 33,78178 | 108,59057 |
| max ₂ | 448,6926 | 1190,1057 |
| max ₃ | 473,44827 | 1207,2843 |
| max ₄ | 464,8955 | 994,3883 |
| max ₅ | 362,47415 | 770,89215 |
| max ₆ | 343,7377 | 698,5618 |
| max ₇ | 339,793 | 571,1343 |
| max ₈ | 146,53598 | 331,86856 |
| max ₉ | 187,07274 | 410,4047 |
| max ₁₀ | 172,76352 | 362,9538 |
| max ₁₁ | 142,42677 | 321,43628 |
| max ₁₂ | 170,99661 | 295,21555 |
| max ₁₃ | 140,03787 | 364,36176 |
| max ₁₄ | 98,230865 | 208,93227 |
| max ₁₅ | 68,81298 | 154,13226 |
| max ₁₆ | 74,12923 | 160,24773 |
| max ₁₇ | 51,78036 | 117,74015 |
| max ₁₈ | 20,73961 | 55,032047 |
| max ₁₉ | 55,946613 | 99,87239 |
| max ₂₀ | 16,036867 | 44,92402 |
| max ₂₁ | 23,404562 | 60,15183 |
| max ₂₂ | 19,944548 | 46,585274 |
| max ₂₃ | 14,242097 | 44,026596 |
| max ₂₄ | 11,504292 | 23,90699 |
| max ₂₅ | 5,2844114 | 13,773306 |
| max ₂₆ | 7,49625 | 17,74915 |
| max ₂₇ | 3,6148624 | 8,03344 |
| max ₂₈ | 4,8835807 | 14,053778 |
| max ₂₉ | 3,2500324 | 9,766679 |
| max ₃₀ | 1,6198401 | 3,8292391 |

Tabla 17: Parámetros de normalización (IV)

| Característica | Media | Desviación Típica |
|------------------------|-----------|-------------------|
| max-freq ₁ | 35,377235 | 14,779791 |
| max-freq ₂ | 109,41023 | 14,310052 |
| max-freq ₃ | 157,08893 | 22,204115 |
| max-freq ₄ | 237,34592 | 25,370153 |
| max-freq ₅ | 310,14645 | 24,312443 |
| max-freq ₆ | 403,7519 | 27,410894 |
| max-freq ₇ | 489,3408 | 23,016937 |
| max-freq ₈ | 584,6093 | 31,939516 |
| max-freq ₉ | 672,22675 | 27,801172 |
| max-freq ₁₀ | 781,4551 | 30,98548 |
| max-freq ₁₁ | 904,9106 | 33,565907 |
| max-freq ₁₂ | 1004,27 | 35,98437 |
| max-freq ₁₃ | 1136,5785 | 49,034184 |
| max-freq ₁₄ | 1269,4824 | 45,24625 |
| max-freq ₁₅ | 1409,3927 | 50,92556 |
| max-freq ₁₆ | 1535,1046 | 41,005337 |
| max-freq ₁₇ | 1704,3861 | 49,30979 |
| max-freq ₁₈ | 1873,1862 | 58,287815 |
| max-freq ₁₉ | 2052,2415 | 60,40939 |
| max-freq ₂₀ | 2217,6611 | 66,80756 |
| max-freq ₂₁ | 2417,3076 | 57,010002 |
| max-freq ₂₂ | 2638,4033 | 58,779163 |
| max-freq ₂₃ | 2857,4375 | 74,33377 |
| max-freq ₂₄ | 3086,9392 | 80,97323 |
| max-freq ₂₅ | 3342,3274 | 80,32275 |
| max-freq ₂₆ | 3589,7864 | 78,69773 |
| max-freq ₂₇ | 3879,9844 | 98,408936 |
| max-freq ₂₈ | 4168,601 | 103,71468 |
| max-freq ₂₉ | 4459,1206 | 91,55003 |
| max-freq ₃₀ | 4837,6816 | 100,40303 |

- $max-freq_i$ indica la **frecuencia donde se alcanza el máximo de intensidad** en el intervalo i en frecuencia.

Para estos experimentos se ha repetido 20 veces el entrenamiento de la RNA en cada *fold*, devolviendo el resultado promedio de esas 20 ejecuciones.

Para poder evaluar el modelo con mejor rendimiento, como ya se ha dicho anteriormente, utilizaremos como medida el promedio del **F1-Score** en los *folds*. Si hay empate en dicha media, se elegirá el modelo con menor desviación típica de la métrica.

5.3.1. Resultados

Para permitir la reproducibilidad de los experimentos, se utilizó 100 como semilla de generación de números aleatorios.

5.3.1.1 RNA

Para el entrenamiento de las RNA, se han utilizado los siguientes parámetros en común:

- Ratio de aprendizaje: 0,01
- Ratio de patrones para el conjunto de validación: 0,2.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento: 1500.
- Máximo número de ciclos (*epochs*) de entrenamiento sin mejorar el error de validación: 5.
- Algoritmo de optimización: ADAM.
- Función de *loss*: *Cross Entropy*.

El hiperparámetro que hemos variado ha sido la arquitectura de neuronas a utilizar. Utilizamos 8 arquitecturas distintas, donde la arquitectura $[i]$ denota una RNA con una única capa oculta con i neuronas y la arquitectura $[i, j]$ denota una neurona con dos capas ocultas; con i neuronas en la primera capa oculta y j neuronas en la segunda capa oculta.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 18

5.3.1.2 SVM

Para las máquinas de soporte vectorial hemos utilizado 8 configuraciones distintas de los hiperparámetros de *kernel*, grado del *kernel* (sólo se utiliza en *kernel* polinomial), *gamma* y C .

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 19

Tabla 18: Resultados RNA

| Arquitectura | F1-Score | Precisión |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| [8] | $0,91045 \pm 0,01106$ | $0,93454 \pm 0,00795$ |
| [16] | $0,98154 \pm 0,00805$ | $0,98529 \pm 0,00607$ |
| [32] | $0,99329 \pm 0,00318$ | $0,99473 \pm 0,00229$ |
| [8, 8] | $0,81746 \pm 0,00835$ | $0,86732 \pm 0,0055$ |
| [16, 4] | $0,51003 \pm 0,02221$ | $0,62847 \pm 0,0195$ |
| [16, 8] | $0,92262 \pm 0,00672$ | $0,94141 \pm 0,00598$ |
| [32, 16] | $0,9773 \pm 0,00769$ | $0,9813 \pm 0,00694$ |
| [32, 32] | $0,98522 \pm 0,00663$ | $0,98798 \pm 0,00494$ |

Tabla 19: Resultados SVM

| (kernel, grado, gamma, C) | F1-Score | Precisión |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| (poly, 3, 1, 1) | $0,99264 \pm 0,0053$ | $0,99382 \pm 0,00422$ |
| (rbf, 3, 1, 1) | $0,10019 \pm 0,01854$ | $0,11513 \pm 0,0161$ |
| (sigmoid, 3, 1, 1) | $0,13051 \pm 0,02229$ | $0,20283 \pm 0,02546$ |
| (poly, 3, 10, 0,1) | $0,99113 \pm 0,00724$ | $0,99314 \pm 0,00464$ |
| (rbf, 3, 10, 0,1) | $0,00179 \pm 7,0e - 5$ | $0,04673 \pm 0,00189$ |
| (sigmoid, 3, 10, 0,1) | $0,10752 \pm 0,01502$ | $0,18363 \pm 0,01528$ |
| (rbf, 3, 0,01, 100) | $0,99504 \pm 0,00411$ | $0,99563 \pm 0,00257$ |
| (poly, 3, 100, 0,001) | $0,99257 \pm 0,00408$ | $0,99379 \pm 0,00278$ |

5.3.1.3 Árboles de decisión

Para los árboles de decisión hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de profundidad máxima.

Se muestran los resultados de la experimentación en la Tabla 20

Tabla 20: Resultados Árbol de decisión

| Altura máxima | F1-Score | Precisión |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 4 | $0,09189 \pm 0,01043$ | $0,17819 \pm 0,0157$ |
| 8 | $0,3111 \pm 0,01697$ | $0,42453 \pm 0,01404$ |
| 16 | $0,71777 \pm 0,04105$ | $0,79892 \pm 0,03264$ |
| 32 | $0,94074 \pm 0,01447$ | $0,94584 \pm 0,01159$ |
| 64 | $0,94887 \pm 0,01332$ | $0,95193 \pm 0,01202$ |
| 128 | $0,95088 \pm 0,00891$ | $0,9555 \pm 0,00573$ |
| 256 | $0,95003 \pm 0,00775$ | $0,95269 \pm 0,0076$ |

5.3.1.4 kNN

Para el modelo kNN hemos utilizado 6 configuraciones distintas del hiperparámetro de k (número de vecinos más cercanos).

Se muestran los resultados de la experimentación en la tabla 21

Tabla 21: Resultados kNN

| K | F1-Score | Precisión |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 2 | $0,98683 \pm 0,00434$ | $0,98845 \pm 0,00303$ |
| 3 | $0,98153 \pm 0,00991$ | $0,98636 \pm 0,00479$ |
| 5 | $0,98086 \pm 0,00835$ | $0,98617 \pm 0,00599$ |
| 8 | $0,97161 \pm 0,01603$ | $0,98024 \pm 0,01049$ |
| 13 | $0,96203 \pm 0,01287$ | $0,97342 \pm 0,00864$ |
| 21 | $0,95836 \pm 0,00902$ | $0,96928 \pm 0,00517$ |

5.3.2. Discusión

Los resultados de esta iteración son muy buenos, ya que hemos aumentado en gran medida el número de notas a clasificar (50) y hemos conseguido varios modelos con más de un 99% de *F1-Score* y precisión.

En concreto, el modelo que mejor funciona es un SVM con un *kernel* de base radial y con valores de *gamma* y *C* de 0,01 y 100, respectivamente. Este modelo alcanzó un *F1-Score* de $0,99594 \pm 0,00411$ y una precisión de $0,99563 \pm 0,00257$, unos valores muy altos y que indican que el sistema funciona muy bien.

Caben destacar también modelos que alcanzan un rendimiento parecido, como puede ser un SVM con un kernel polinomial de grado 3, con ambos valores de *gamma* y *C* de 1, además de una RNA con una única capa oculta con 32 neuronas.

En contra, el modelo que peor rendimiento presenta es un SVM con un *kernel* de base radial, con valores de *gamma* y *C* de 10 y 0,1, respectivamente. Cabe destacar que este modelo es similar al modelo que presenta el mejor rendimiento, siendo lo único que cambia los parámetros de *gamma* y *C*. Es notable ver que un ligero cambio en estos dos parámetros, puede producir que un sistema pase de ser muy malo, a ser tremendamente bueno.

Como hemos podido ver, los resultados son muy buenos en general, pero estos sistemas tienen un problema (principalmente las RRNNAA), y es que el tiempo de entrenamiento es mucho mayor que en aproximaciones anteriores. Creemos que esto se puede deber tanto por aumentar el número de instancias (anteriormente 1090, y en esta aproximación, 3194) a utilizar por el sistema, como por el número de características que se utilizan (122). Como hemos obtenido resultados muy buenos, estaría bien que en una próxima aproximación se intente reducir el número de características, intentando no perder el rendimiento de clasificación del sistema, y así poder producir modelos que sean más rápidos de entrenar, a la vez que más rápidos para realizar predicciones ante futuros patrones.

En la matriz de confusión de la Tabla 22 hemos omitido por razones de tamaño las filas y las columnas donde el sistema no se confunde, a excepción de las 5 primeras y las 8 últimas para definir el rango de notas de esta aproximación y su patrón diagonal de aciertos. Al igual que anteriores aproximaciones podemos destacar que los fallos son entre notas con frecuencias muy parecidas como pueden ser G1(48,99 Hz) y A1(55 Hz) o G1(48,99 Hz) y E2(82,40 Hz).

| | | Predic. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | A1 | A2 | ... | B4 | B5 | B6 | B7 | D1 | ... | E1 | E2 | E3 | ... | E6 | E7 | F1 | F2 | F3 | ... | F6 | F7 | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | G7 | |
| Real | C1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C2 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C3 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C4 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | C5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | B5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | B6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | ... | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | B7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | E7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | F1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | F2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 1 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| | G6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| | G7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |

Tabla 22: Matriz de confusión mejor modelo

6. Conclusiones

7. Trabajo futuro

8. Bibliografía

Referencias

- Baevski, A., Hsu, W.-N., Conneau, A., & Auli, M. (2021). Unsupervised speech recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34.
- Benetos, E., Dixon, S., Duan, Z., & Ewert, S. (2018). Automatic music transcription: An overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 20-30.
- Chang, S., Lee, J., Choe, S. K., & Lee, K. (2017). Audio cover song identification using convolutional neural network. *arXiv preprint arXiv:1712.00166*.
- Foo, S. W., & Wong, P. L. (1999). Recognition of piano notes. *IEEE International Conference on Information, Communications and Signal Processing (1999: Singapore)*.
- Klapuri, A. (2004). *Signal processing methods for the automatic transcription of music*. Tampere University of Technology Finland.
- Marolt, M., Kavcic, A., & Privosnik, M. (2002). Neural networks for note onset detection in piano music. *Proceedings of the 2002 International Computer Music Conference*.
- Osmalsky, J., Embrechts, J.-J., Van Droogenbroeck, M., & Pierard, S. (2012). Neural networks for musical chords recognition. *Journées d'informatique musicale*, 39-46.
- Solanki, A., & Pandey, S. (2019). Music instrument recognition using deep convolutional neural networks. *International Journal of Information Technology*, 1-10.