

Musicalización de electrocardiogramas

Valentí Montoya Aguilar, *ETSE-UAB*

uveeme@gmail.com

Abstract—La música puede emplearse no sólo para la evocación de sentimientos sino también para la transmisión de información. En este trabajo se propone un método en este sentido que se basa en una forma general de musicalización que vincula algorítmicamente la composición musical y el fenómeno que se monitoriza. El procedimiento resultante ha sido diseñado específicamente para los electrocardiogramas (ECG). Las composiciones musicales generadas ofrecen melodías agradables en el caso de sujetos sanos que se alteran notablemente y se tornan disonantes si los pacientes manifiestan determinadas enfermedades o disfunciones.

Index Terms—Music, Computer music, Electrocardiography, ECG+, Fourier series, Frequency domain analysis, Augmented reality.

I. INTRODUCCIÓN

Es típico encontrar alarmas sonoras en el mundo real. El temporizador de un horno, la puerta que se cierra de un vagón de metro, la bocina de un coche que se acerca peligrosamente, y un largo etcétera son ejemplos de alarmas sonoras que transmiten información. Aunque se transmite información, esta sigue siendo limitada y pobre en comparación con otras señales. Es necesario un lenguaje sonoro más complejo para la transmisión de información estructurada. No resulta suficiente emitir una frecuencia, o un conjunto de ellas para cubrir esta necesidad. Por lo tanto, la sonorización de un fenómeno no es útil para la transmisión de una gran cantidad de información. En otras palabras, si los mecanismos de sonorización son muy simples la información que se transmite es muy limitada. Es útil para transmitir información simple como la de una alarma: es una información binaria en la que sólo se transmiten dos datos, o hay alarma y se transmite un sonido o no hay. Para la transmisión de información más compleja como puede ser la evolución de un señal en el tiempo, la sonorización [B] fracasa. En cambio, el lenguaje musical ofrece los mecanismos necesarios para establecer un proceso de comunicación.

La música y el lenguaje pueden considerarse como dos códigos diferentes de comunicación [1]. Estos se entrelazan cuando cantamos para constituir un código común. Son dos sistemas formales y elaborados capaces de transmitir información. La complejidad de la adquisición del lenguaje escapa a menudo a nuestra atención, en tanto que se trata de una habilidad cotidiana desde los primeros días de vida. Del trabajo [2] se concluye que el cerebro es sensible a los procesos musicales. Puede distinguir los cambios de entonación aunque no se conozca nada de música. Este estudio, confirmaría la hipótesis: que la comprensión de la música, como la del lenguaje, es innata en el ser humano.

Otros estudios llevados a cabo por los mismos autores apuntan a que la relación entre el ser humano y la música es más profunda de lo que se cree, y que ésta puede condicionar no sólo la actividad cerebral, sino también la biología y el estado de ánimo.

Convencionalmente, la finalidad esencial del lenguaje musical es el desarrollo de las capacidades vocales, rítmicas, psicomotrices, auditivas y expresivas, de modo que el código musical pueda convertirse en instrumento útil y eficaz de comunicación y representación; funciones básicas que aparecen en la práctica musical, al igual que en toda actividad lingüística [3]. Todo y ser así, este trabajo investiga el uso del lenguaje musical para la transmisión de información objetiva. Se aparta de cualquier expresión artística de la música para conseguir este objetivo.

Este trabajo se propone como objetivo la transmisión de información a través de la música. Para ello, se ha adoptado un método general para la musicalización de fenómenos monitorizados. Este método se ha particularizado para la musicalización del electrocardiograma (ECG). Su forma de onda ha sido objeto de multitud de estudios de los que se puede extraer un patrón de comportamiento no patológico. Es una herramienta utilizada para el diagnóstico, y por lo tanto, este método tiene aplicaciones médicas. La idea fundamental es que la música proporciona una forma de transmitir la información relevante de un ECG. Tiene utilidad para sustituir otros canales de información.

La estructura de este artículo se ha organizado de la siguiente manera: la sección II expone los conceptos básicos del lenguaje musical, así como la capacidad de transmitir información de la música. La sección III describe el método general para la musicalización de fenómenos monitorizados. La sección IV introduce el sistema implementado para la transmisión de información relevante de un ECG. En ella se presenta un demostrador para la composición musical de ECG. Y finalmente, la sección V se dedica al análisis y comprensión de resultados. Se termina con las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo.

II. EL LENGUAJE MUSICAL

El lenguaje es la facultad humana de comunicarse mediante un sistema de signos (auditivos, táctiles, visuales) que depende de aptitudes fisiológicas y se relaciona con el exterior mediante un simbolismo convencional. Según esto, la música es un tipo de lenguaje. La música ha elaborado el código lingüístico más complejo existente en el arte [4]. El lenguaje musical es algo

único y propio de la música. El desarrollo de la notación, las formas de medir el tiempo, los sonidos, la composición, la partitura y un largo etcétera configuran un modo único de organización que exige años de estudio para dominarlo. En lo simple y en lo complejo, la música se configura como un lenguaje individual en tanto que interiorizado, pero también social, como medio comunicativo excepcional (la figura 1 muestra un ejemplo de comunicación musical).

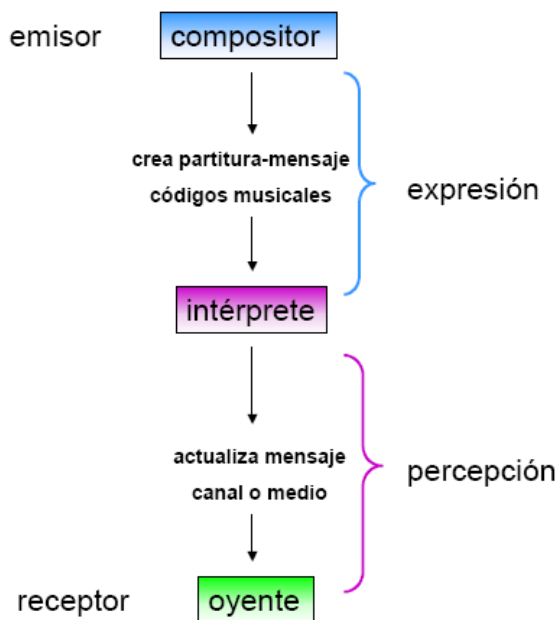


Fig. 1. La música como lenguaje o medio de comunicación.

Es importante destacar esta finalidad comunicativa para adoptar un enfoque basado en la expresión y en el conocimiento de un sistema de signos que sólo adquieren sentido cuando están interrelacionados, cuando configuran un discurso. La música es el resultado de esta interrelación. Por ello, el proceso de adquisición de los conocimientos del lenguaje musical deberá apoyarse en procedimientos que desarrollen las destrezas necesarias para la producción y recepción de mensajes. Es un lenguaje complejo porque tiene distintos elementos que se conjugan para obtener un orden y una coherencia (tiempo, compás, ritmo, melodía, armonía, tonalidad, etc.). Y es estructurado porque posee un conjunto de reglas para su composición.

La música es innata en todas las culturas humanas, y existen evidencias que sugieren que la habilidad de apreciar la música puede desarrollarse incluso sin un entrenamiento explícito [5]. Al igual que el habla, la música está jerárquicamente organizada [6] y [7]. La música tiene un poder de evocación que va más allá de transmitir una información de alerta, es capaz de generar un amplio abanico de sensaciones. Resulta complejo utilizar la música para la transmisión de información, ya que su poder de evocación hace complicada una parametrización de sus sensaciones. Aunque, a través de composiciones simples y monótonas, olvidando la componente más artística, es posible la transmisión de información objetiva a través de la música.

Un posible ejemplo es el caso de un oyente que escucha una composición simple y tranquila. Este, por asimilación, dejará de prestar atención que es lo deseable porque no debe generarle preocupación. En el momento que se genera cualquier tipo de problema, la composición musical responderá de forma que el oyente notará un cambio que le hará recuperar la atención sobre lo que escucha. Este es el primer grado de información aportado, el más simple y directo que no necesita de un oído entrenado. Además, el lenguaje musical es suficientemente potente como para describir al oyente que tipo de problema se ha producido. La musicalización es la transformación de información relevante obteniendo como resultado una composición musical.

III. MUSICALIZACIÓN DE UN FENÓMENO MONITORIZADO

La musicalización se entiende como una forma de composición y generación de música basada en el tratamiento de una serie de datos. La composición musical obtenida responde a unas características derivables de dicha serie de datos. Se basa en el tratamiento de una serie de datos representativa de un fenómeno monitorizado, y en particular, en un método de comunicación de información referente a tales datos mediante la música. Concluyendo, se utiliza la música como canal de transmisión de la información objetiva asociada a un fenómeno.

A. Revisión de métodos

En [8] se presenta un dispositivo que combina una pluralidad de señales de audio de entrada y emite una señal de audio combinada. Las señales de audio de entrada incluyen una señal de música, por ejemplo, procedente de un reproductor de discos compactos (CD) o casete, y una señal rítmica generada a partir de los latidos del corazón de un usuario. El dispositivo aumenta o disminuye el tiempo o tempo del ritmo de la música de acuerdo con variaciones en el ritmo de las pulsaciones cardíacas.

En [9] se expone un método de codificación de información sobre el ritmo cardíaco. El método comprende medir los intervalos de los latidos del corazón de una persona durante un ejercicio físico y almacenar la información referente a estos intervalos de latido del corazón. A continuación, la información de intervalos de latido del corazón es codificada usando un género musical seleccionado a un formato adecuado para ser presentado de forma audible después del ejercicio como una mezcla sonora formada por pequeños fragmentos musicales previamente almacenados. El ritmo de la mezcla sonora depende de los intervalos de latidos de corazón medidos, y la duración de la mezcla sonora es más corta que el tiempo empleado para medir los intervalos de latidos de corazón.

Aunque en [10] se describe un método de musicalización general, también puede aplicarse a los ritmos cardíacos y a los ECG. El método también concierne a unos criterios simplificados de composición de música en función de la información a transmitir.

B. Método de musicalización adoptado

Se ha utilizado [10] como método general para la musicalización de fenómenos monitorizados. La elección ha sido motivada por la escasez de información que se puede transmitir con [8] y [9]. Estos se concentran en la transmisión de una única variable de la señal monitorizada, el ritmo cardíaco. En cambio [10] describe un método válido para cualquier tipo de fenómeno monitorizado y que permite la extracción de más de una variable. Por lo tanto, el método adoptado es claramente más versátil y potente.

El método describe el funcionamiento básico del proceso de musicalización de señales. La figura 2 muestra un ejemplo de realización del método a partir de una serie de datos proporcionada, por ejemplo, por un equipo de monitorización que monitoriza o ha monitorizado un fenómeno. La serie de datos conforma una forma de onda 2-(1). Es sometida a un tratamiento matemático por un módulo extractor de características musicales básicas (BFX). Se obtienen uno o más valores para una o más variables asignadas a diferentes características musicales básicas. Estas son introducidas en un módulo de composición (MC). Con ayuda de unos medios programables se genera una composición musical 2-(2). Está basada en una estructura musical general determinada, en parte, por dichas características musicales básicas de acuerdo con preceptos de composición musical establecidos. Se tiene un especial cuidado en generar dicha composición musical en la forma de una composición musical consonante de acuerdo con preceptos de composición musical convencionales, y con una estructura musical general simple, para que la composición musical resultante responda a criterios de musicalidad y sea lo más agradable al oído posible. El método contempla introducir unas condiciones de alarma preestablecidas. Pueden comprender, por ejemplo, unos umbrales mínimo y máximo para los datos de la serie de datos o unos patrones de alarma preestablecidos para la forma de onda. Las condiciones son introducidas en un módulo de detección de condiciones de alarma (ACD) 2-(3). Este analiza la serie de datos o forma de onda de entrada para comprobar si en algún momento se cumplen las condiciones de alarma. Cuando el módulo ACD detecta alguna de las condiciones de alarma en la serie de datos o forma de onda, se introduce una señal de alarma a un módulo de inserción de disonancias (DI). DI inserta un sonido disonante a la composición musical consonante 2-(2). Un oyente percibirá variaciones en la estructura musical general indicativas de variaciones “ordinarias” en el fenómeno monitorizado y disonancias indicativas de variaciones “extraordinarias”. Las disonancias pueden ser anomalías u otras características que se desea destacar en el fenómeno monitorizado mediante las condiciones de alarma.

Este método asegura que cualquier variación perceptible en la estructura musical general durante la audición, se corresponde a una variación en la serie de datos o forma de onda inicial. Por consiguiente, la composición musical es generada de acuerdo con un método capaz de proporcionar información referente a variaciones del

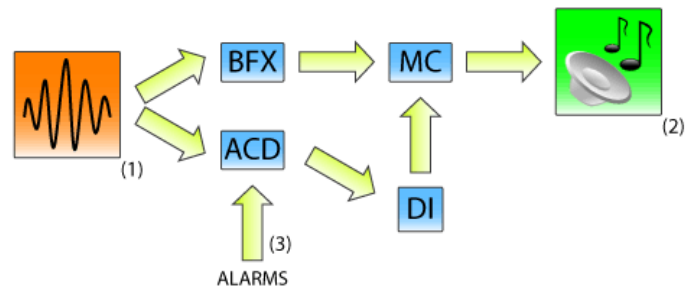


Fig. 2. Diagrama de bloques. Ejemplo de realización del método incluyendo una etapa de introducción de alarmas.

fenómeno monitorizado.

El método puede aplicarse a la serie de datos o forma de onda a medida que la misma es recibida, es decir, en tiempo real, o tomando una serie de datos o forma de onda previamente generada y almacenada en una memoria informática.

Al módulo MC pueden imponerse algunas componentes de la estructura general de la composición musical tales como, por ejemplo: un compás 4/4; el modo mayor; las funciones armónicas tónica, subdominante y dominante; un rango abarcando las octavas centrales del piano; un máximo de cuatro notas diferentes simultáneas, es decir, una melodía simple sobre acordes de tríada. Todos estos preceptos se encaminan para obtener una composición musical tranquila y agradable al oído.

IV. MUSICALIZACIÓN DE ECG

La musicalización en tiempo real de los ECG es una forma alternativa de presentar la información a los usuarios, por ejemplo, en salas de operaciones o en lugares donde la representación gráfica no sea posible. Para el ámbito de este trabajo, lo importante es poder diseñar un método particularizado a partir del método general de musicalización presentado y poder realizar pruebas de validación musical. Por lo tanto, lo más importante es disponer de un método que genere resultados para poder evaluar la efectividad del método. Dicho esto, se ha optado por desarrollar un demostrador *offline* para la generación de resultados. Esto permite la transmisión completa de la información relevante del ECG. El método de musicalización de ECG se divide en dos áreas. La primera es la definición de patrones de comportamiento no patológico de un ECG. Es necesaria para poder crear el sistema de alarmas que introducirán las variaciones perceptibles en la estructura musical. Y la segunda es la utilización de conocimientos de composición musical para generar dicha composición musical en la forma de una composición musical consonante de acuerdo con preceptos de composición musical convencionales.

A. ECG

Un ECG [A] es un registro gráfico de los potenciales eléctricos generados en el corazón durante el ciclo cardíaco.

Se ha elegido como señal a la que realizar un proceso de musicalización ya que se trata de una señal de la que se conoce con exactitud su comportamiento de normalidad, es decir, de salud del paciente. Se conoce la situación de los puntos singulares P, Q, R, S, T y U, y cómo se disponen en unas regiones particulares del período (la figura 3 muestra la forma de onda típica de una señal ECG). Variaciones en los puntos pueden significar anomalías en el funcionamiento cardíaco del paciente.

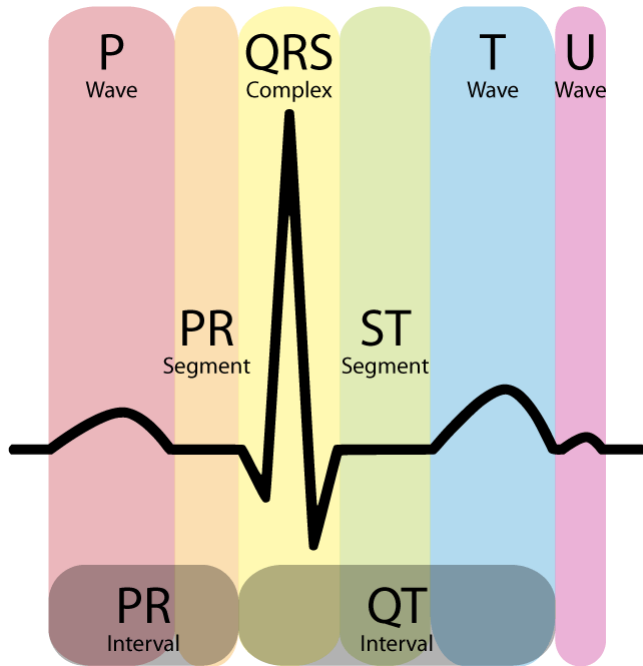


Fig. 3. Trazado típico de una señal ECG. Se observan las diferentes ondas que la constituyen: P, Q, R, S, T y U.

Un ECG es la composición de diferentes derivaciones (figura 4), debido a la disposición específica de los electrodos en el cuerpo humano. Cada derivación “mira” una parte específica del corazón desde diferentes ángulos. Para simplificar el método de composición únicamente se ha tenido en cuenta la segunda derivación (D2), ya que como indican [11] y [12] se trata de una derivación muy útil para precisar el ritmo cardíaco, la posición del corazón, las medidas de las ondas, espacios y segmentos, el diagnóstico positivo y diferencial de las arritmias, crecimientos auriculares, bloqueos interauriculares y el *Síndrome de Wolff-Parkinson-White* (WPW). Tal y como indica [13], el uso de una única derivación imposibilita un diagnóstico definitivo. En cualquier lugar, en este trabajo se discute sobre la posibilidad de transmitir información a través de una composición musical y no sobre su aplicación final.

La transformación del ECG en música requiere conocer la morfología de la D2 de un ECG. Se ha tomado como referencia las monografías en electrocardiografía [14], [15] y [11] que estudian la forma de onda representada en el registro de un ECG. Estos estudios parametrizan las características morfológicas de la D2 de un ECG considerada no patológica o normal [C]. El método de musicalización contempla extraer

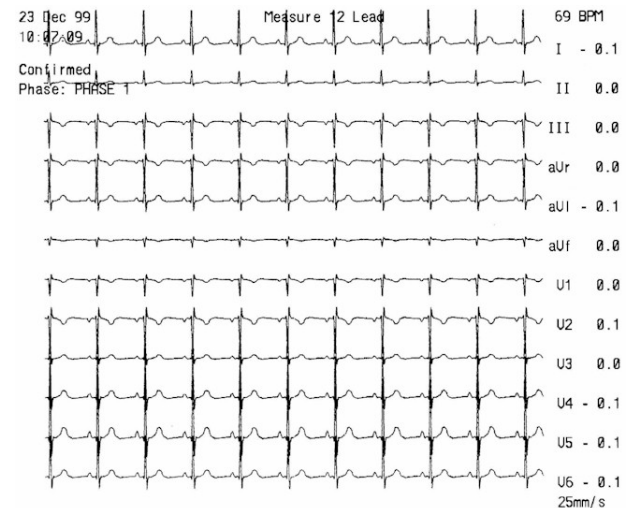


Fig. 4. Trazado típico de las 12 derivaciones de un ECG.

una serie de variables del ECG para ser asociadas a características musicales básicas. El marco de este trabajo no abarca el desarrollo de un extractor de características de señales ECG [16]. Por este motivo se ha empleado un simulador de ECG para generar las señales necesarias para el proceso de musicalización.

B. Simulación de ECG

Las características que modelan el simulador ideal a desarrollar son:

- Simplicidad del método utilizado.
- Conocimientos básicos de medicina.
- Señales ECG sencillas de generar.
- Patrones ECG sin variabilidad.
- Señales ECG fáciles de parametrizar.
- Señales ECG sin ruido.

Para la realización del simulador existen dos modelos matemáticos distintos en que basarse: [17] y [18]. En el desarrollo del simulador de ECG se ha utilizado el modelo basado en las series de Fourier. La elección del método se ha basado en los requerimientos y en las características que aportan ambos métodos. Por una parte [18] aporta muchas variables interesantes para una generación dinámica de ECG que no se aproximan a la idea del simulador ideal requerido, en cambio, el modelo basado en Fourier cuenta con la experiencia y el conocimiento de trabajos previos, ya que se había trabajado anteriormente con este modelo. Las características del modelo basado en Fourier se adaptan a las necesidades de la simulación requerida. A esto cabe mencionar que la versión C del simulador [19] tiene ciertas peculiaridades que si bien se trata de un código fuente bajo licencia GNU GPL, utiliza librerías propietarias del paquete Numerical Recipes [20], en concreto `dfour1.c` y `ran1.c`, para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, la versión ejecutable del ECGSYN para GNU/Linux, Solaris y Windows [19] es totalmente funcional, pero será imposible modificar el código fuente con la finalidad de adaptar el método.

Concluyendo, la decisión de utilizar el modelo basado en Fourier para implementar un simulador de ECG está motivada por cuestiones relativas al conocimiento acumulado, mejor adaptación a las necesidades de simulación, menor tiempo de desarrollo, mejor integración y, finalmente, por ser totalmente independiente de recursos propietarios, que no tienen validez en el ámbito en el que se realiza este trabajo.

Con la utilización de un simulador de ECG se dispone de la morfología de la señal y de una señal ECG realista de la que se puede extraer información. El simulador empleado [A] parametriza las diferentes ondas de un ECG asignando valores a la amplitud, a la duración y al tiempo respecto el pico R (figura 5). Estas variables se asocian a características musicales básicas. La señal ECG generada por el simulador se utiliza para obtener un análisis frecuencial (figura 6).

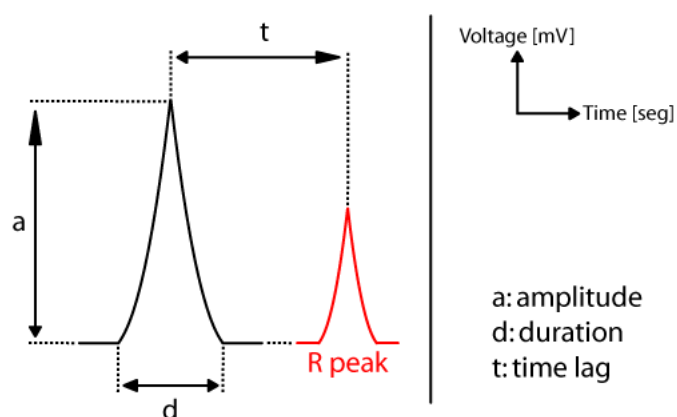


Fig. 5. Morfología de una onda perteneciente a una señal ECG. (a) es la amplitud expresada en mV. (d) es la duración del pulso en segundos. Y (t) es el tiempo que separa la onda parametrizada y el pico R que se usa como referencia.

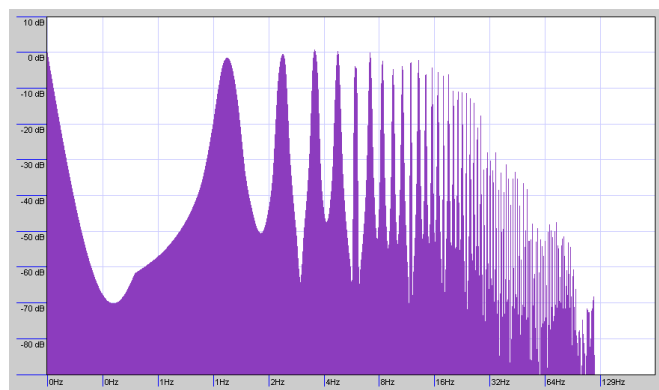


Fig. 6. Representación gráfica del espectro en frecuencia de una señal ECG.

C. Composición musical

El método establece criterios simplificados de composición en función de la información a transmitir. Con la idea de aportar información relevante del ECG, la composición musical se ha basado en los conceptos más sencillos y convencionales.

De esta manera, de entre todas las opciones disponibles, se ha utilizado como base las convenciones más utilizadas y generales. Para la melodía se ha usado como rango tonal, sinónimo de normalidad, el rango entre las octavas C3 y C4. Este rango engloba las octavas centrales de un piano que se sitúan en un rango audible cómodo. Los acordes que acompañan se sitúan entre C2 y C3 para no interferir, dando más naturalidad a la composición. Las tesituras superiores o inferiores se utilizan para dar información de anomalía. La elección de un compás de 4/4 tiene diversos motivos: común, estable, el patrón ECG consta de cuatro partes características y ofrece margen a la composición. Cada parte distinguible de un ECG (P, QRS, T y U) es asignada a un compás. Si bien, otra opción sería asignar cada parte del ECG a un tiempo de compás, se descarta por ser excesivamente compacta y poco apreciable. Cada compás tiene una función tonal distinta que servirá para identificar cada parte de un ECG. La figura 7 muestra la asignación de cada compás a cada onda del ECG.

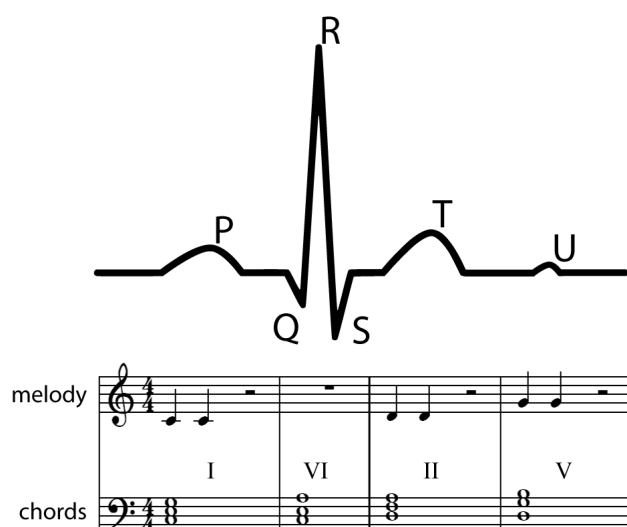


Fig. 7. Secuencia de acordes y su correspondencia con las ondas del ECG. Las funciones de este patrón son la de Tónica - Subdominante - Subdominante - Dominante. Los acordes I y V son mayores, los VI y II son menores.

La forma de onda obtenida por el simulador es procesada para extraer información frecuencial para ser usada como variable asociada a características musicales. A su vez, cada onda del ECG está parametrizada por tres variables: duración, amplitud y tiempo respecto el pico R (figura 5). Estos tres parámetros también son usados para representar otras características musicales básicas. Cada onda tiene definido un umbral mínimo y máximo para cada variable. El valor de cada variable debe permanecer entre estos límites para ser considerada normal o no patológica. Las características musicales básicas elegidas para ser modificadas durante el proceso de musicalización son: la tonalidad, el tiempo o tempo de la composición musical, la frecuencia de la nota, la duración de la nota, la intensidad de la nota y el intervalo entre las notas de la melodía. A continuación se detalla como se relaciona cada variable extraída de la señal ECG con la composición musical resultante.

1) *Análisis frecuencial*: El análisis frecuencial de la señal ECG permite reconocer la frecuencia con la que se repite el patrón ECG generado. Esta frecuencia es la que se utiliza como variable para escoger la tonalidad de la composición. Siempre se usa la tonalidad mayor porque es la más neutra. La frecuencia del patrón en realidad es la frecuencia cardíaca. Los cambios de frecuencia se traducen en cambios tonales de la composición. La frecuencia cardíaca también se usa para establecer un tiempo o tempo a la composición. A mayor frecuencia, más rápida será la composición y viceversa.

2) *Duración*: La duración establece qué patrón rítmico se usa para la melodía del compás. También indica la cantidad de tiempos que se utilizan en el compás. La elección de un compás u otro informa sobre la normalidad de la duración de la onda.

En P, T y U se utilizan dos figuras rítmicas. Cada onda se divide en dos partes a la que se asocia cada figura rítmica. Desde el inicio hasta el pico de la onda, y desde el pico hasta el final. Cada figura rítmica transmite la información de la pendiente y del tiempo parcial de cada división. Para la pendiente se utiliza la intensidad de la nota y para el tiempo la duración de la nota. El complejo QRS utiliza tres figuras rítmicas. Cada onda del complejo utiliza una figura rítmica. La figura 8 muestra los distintos patrones rítmicos utilizados. Cada patrón se asocia a una morfología distinta de duración de la onda.

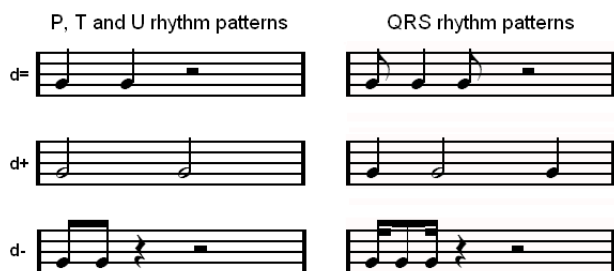


Fig. 8. La columna de la izquierda muestra los patrones rítmicos utilizados en P, T y U. La de la derecha los utilizados para el complejo QRS. (d=) indica un valor dentro de la normalidad. (d+) indica un valor por encima del límite superior. (d-) indica un valor por debajo del límite inferior.

3) *Amplitud*: La amplitud, establece la altura en frecuencia de la melodía. En una primera aproximación, si la amplitud es normal la nota se sitúa en la octava normal. Si está por encima o por debajo, se utilizará una octava más o menos. Además, la elección de la nota de la primera figura rítmica del compás se realiza en base a lo próximo que sea el valor de la amplitud del valor medio normal. Cuanto más alejado, menos natural será la elección de la nota. Cuando la onda está invertida o no aparece en el ECG se silencia el compás (melodía y acorde).

4) *Tiempo respecto el pico R*: El tiempo respecto el pico R, establece la nota de la segunda figura rítmica del compás. Se utiliza la característica musical del intervalo para transmitir la información de la distancia. Si el tiempo es normal, la nota se repite. En caso contrario, se crea un intervalo directamente relacionado con el tiempo respecto el pico R.

D. Condiciones de alarma

Las condiciones de alarma se describen sobre las variables: amplitud, duración y tiempo respecto el pico R. Nótese que la alarma que describe un pulso cardíaco excesivo o casi inexistente, ya está perfectamente indicado al escuchar una composición extremadamente rápida o demasiado lenta. Cuando alguno de estos parámetros entra en rangos de valores patológicos, se introducen las alarmas necesarias sobre la característica musical básica. De esta manera, si la duración no está sobre el recorrido de valores normales, se usa un patrón rítmico patológico. Si la amplitud de la onda está por encima o por debajo de los valores normales, se coloca la melodía en una tesitura diferente a la normal y se introduce una nota que no pertenece al tono. O si bien, el tiempo respecto el pico R no se corresponde al intervalo de valores correctos, se percibe un intervalo entre la primera y segunda nota. Las alarmas insertadas sobre estas tres características musicales básicas son más o menos acentuadas en función del grado de importancia de la alteración. Otra señal de alarma es cuando la onda está invertida o no aparece. Es ese caso, no habrá ni melodía ni acorde en el compás asociado a la onda.

V. RESULTADOS

Para comprobar la efectividad del método se han realizado pruebas complementarias. El objetivo es demostrar la efectividad del método desarrollado. Las pruebas incluyen un entrenamiento básico y unos conceptos mínimos de electrocardiografía. Estas se han basado en la identificación de: patrones normales y patrones patológicos, cambios en la frecuencia cardíaca (arritmias), ondas del patrón ECG, problemas asociados a la onda P y patologías en el complejo QRS. Se ha creado un juego de pruebas básico para estas identificaciones. En la realización de las pruebas no se ha utilizado una población suficiente como para que los resultados se puedan aplicar a toda la población, pero son suficientes como para obtener conclusiones del método.

A. Descripción del experimento

Las pruebas se han realizado a ocho personas. Ninguna persona tenía conocimientos de electrocardiografía. Sólo una persona tenía conocimientos musicales. A cada persona se le han explicado los conceptos básicos de electrocardiografía utilizados en el método. Se ha seguido una metodología incremental que ha servido como entrenamiento para el reconocimiento de características del ECG. Se le ha explicado al sujeto la intención de cada fase realizada. No se le ha explicado a qué característica musical básica se relaciona cada variable del ECG, ya que se quería una respuesta no condicionada de la sensación que le producía. Al terminar la audición de cada composición musical, se le ha preguntado al sujeto por la percepción causada y la información que le transmite.

B. Discusión de los resultados

Claramente, las cuestiones rítmicas son las que más fácilmente se reconocen: las pulsaciones por minuto y el patrón rítmico de la melodía usado en cada onda del ECG. Las

disonancias o los sonidos desagradables saben captar muy bien la atención. Cuando estas aparecen, el usuario presta más atención y se predispone a recibir información. La ausencia o la inversión de las ondas también fueron detectadas.

La identificación de las ondas del ECG no ha sido la esperada. La secuencia armónica que identifica las partes no resulta tan evidente como se esperaba. De todas formas, el patrón ternario del complejo QRS ayuda en la identificación de la secuencia. Por otro lado, es un hecho evidente que la identificación de frecuencias es un problema para los usuarios. La transmisión de información en este sentido requiere de un entrenamiento específico.

VI. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y el trabajo realizado, esta sección se dedica a enumerar las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo.

A. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la transmisión de información objetiva a través de la música. Una composición musical capaz de ofrecer información al oyente. Para ello, se debe conocer el uso del lenguaje musical para ofrecer una composición musical en la forma de una composición musical consonante de acuerdo con preceptos de composición musical convencionales. Apartándose de la expresión artística de la música, se puede obtener una composición simple y con la única función de transmitir información. Se ha adoptado un método de musicalización general de fenómenos monitorizados, para desarrollar un método dedicado a la composición musical de señales ECG. Como resultado, se obtiene una música que transmite la información más relevante del ECG.

B. Trabajo realizado

Como parte de este trabajo se ha desarrollado e implementado un sistema demostrador del proceso de musicalización de la D2 de el ECG. La aplicación final [D] consiste en un sistema que incluye: un simulador de ECG [A], un módulo sonorizador de ECG [B] y un método de musicalización de ECG [C]. Se trata de una aplicación diseñada para probar la musicalización de ECG. Es capaz de generar de forma automática composiciones musicales a partir de patrones de señales ECG. El sistema recibe como parámetro un archivo XML con una secuencia de patrones que forman una señal ECG. El simulador de ECG genera la señal a partir de la secuencia indicada en el archivo. El módulo sonorizador de ECG convierte de cuatro formas distintas la señal ECG en un archivo WAVE. Este trabajo ha desarrollado un método de composición musical de ECG a partir del estudio de la D2 de un ECG y de conocimientos de composición musical. Este método conforma el módulo más importante del sistema, el musicalizador de ECG. Está diseñado de tal forma que sea parametrizable. A partir de las características de la onda y la forma de onda se obtienen las variables asociadas a las características musicales básicas de la composición musical. La composición musical generada se presenta al usuario en

formato de archivo MIDI [21]. Se ha escogido el formato MIDI ante otras alternativas [22] ya que es la forma más natural y sencilla de trabajar con un formato para representar una composición musical. Un archivo MIDI es básicamente un formato contenedor de partituras.

C. Reflexión

De la realización de este trabajo y los resultados obtenidos se puede afirmar que la música es útil para la transmisión de información objetiva. Los resultados demuestran que los usuarios son capaces de recibir información a través de la composición musical. Aunque para obtener un mejor rendimiento del método, los usuarios deben someterse a un entrenamiento específico.

El método creado contempla el uso de una única derivación de un ECG y por eso su aplicación es limitada. Esta simplificación no impide la generalización del método a las otras derivaciones. El método es escalable a las otras derivaciones. Contemplando el uso de las demás derivaciones, el método tendría aplicaciones médicas.

El método obtenido puede ser sintonizado para permitir afinar la percepción del oyente. Las características musicales asignadas a las variables obtenidas pueden ser modificadas para obtener una mejor respuesta del método. La parametrización del método de musicalización permite la modificación del resultado final, mejorando los resultados.

Se ha desarrollado un método que contempla el uso de una sola derivación. Por lo tanto, la melodía se ha construido con una única voz. Puesto que el lenguaje musical es extremadamente potente y las posibilidades de la composición son infinitas se pueden generar composiciones musicales con más de una voz asignadas a otras derivaciones tales como D1 y D3. Adicionalmente, las voces se pueden componer para otros instrumentos.

Otra de las aplicaciones de la transmisión de información a través de la música se adentra en el campo de la realidad aumentada (RA). La RA busca agregar información virtual a un entorno real, en contraposición a la realidad virtual (RV), que busca una inmersión del individuo en el ambiente virtual [23]. La RA agrega datos (gráficos, 3D, audio, y otros) a un entorno en tiempo real. Un sistema de RA, entonces, genera una visión compuesta para el usuario siendo una combinación de la escena real vista por el usuario y de una escena virtual generada por el computador que aumenta (en el sentido de enriquecer) la escena con la información adicional.

D. Líneas de futuro

Un trabajo de investigación deja patente muchas posibles mejoras y líneas futuras de trabajo. Este trabajo se ha concentrado en la transmisión de información a partir de la música. Investigando en esta dirección, aparecen un sinnúmero de mejoras aplicables al método básico o aplicaciones del método en un

entorno real. También resulta necesario una fase de pruebas más compleja y exhaustiva. Los pasos a seguir a corto plazo más relevantes son:

1) Una de las fases importantes de la investigación es la obtención de resultados a partir de experimentos. En este trabajo se han realizado pruebas sobre una población no lo suficientemente representativa. Para poder obtener unos resultados con mayor valor estadístico, se debería realizar sobre una muestra más significativa de la población. Serviría para relacionar los resultados con características relevantes de la población. Se tiene en consideración realizar pruebas a través de un entorno *web* que facilite la experimentación con el mayor número posible de personas. A través de un formulario con un *plugin* para la reproducción de archivos MIDI, el usuario describiría su percepción de la información transmitida.

2) Para dotar de utilidad médica al método de musicalización se debe tener en cuenta el resto de derivaciones necesarias para un diagnóstico médico. Una posible adaptación del método consiste en la composición de más voces musicales en la melodía asociadas a las otras derivaciones del ECG. Se debería plantear el método de musicalización para más voces.

3) El método de musicalización general es sumamente potente y permite aplicar el proceso a otros fenómenos monitorizados. Se pueden obtener variables de cualquier fenómeno modelable como una secuencia de datos. Estas son asignadas a las características musicales de la composición. Parametrizando un patrón de normalidad de la secuencia de datos se describe un sistema de condiciones de alarma. Como ejemplo, se puede pensar en una aplicación del método para aeropuertos. Los vectores de aproximación de los aviones modelarían una señal de datos. La composición musical resultaría advertiría de la distancia entre ellos y de los posibles conflictos de itinerarios.

4) Una línea de trabajo inmediato consistiría en el desarrollo de un extractor de características que proporcione el valor de las variables de un ECG. Una vez hecho esto, la adaptación para una ejecución en tiempo real resulta sencilla. Además, se tendría que tener en cuenta la composición musical que advierta de los cambios de forma sincronizada a su manifestación en la señal.

APÉNDICES

- [A] Simulación de electrocardiogramas (ECG)
- [B] Sonorización de electrocardiogramas (ECG)
- [C] Transmisión de información a través de la música
- [D] Aplicación para la musicalización de electrocardiogramas (ECG)

REFERENCIAS

- [1] M. M. Lafarga, "Música y lenguaje. una experiencia educativa para la formación del profesorado de educación musical," *Revista de la Lista Electrónica Europea de Música en la Educación*, vol. 5, p. 1, 2000. [Online]. Available: <http://musica.rediris.es/leeme/revista/lafarga.htm>
- [2] D. Sridharan, D. J. Levitin, C. H. Chafe, J. Berger, and V. Menon, "Neural dynamics of event segmentation in music: Converging evidence for dissociable ventral and dorsal networks," *Neuron*, vol. 55, no. 3, pp. 521–532, August 2007. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WSS-4PB1JGW-K&_user=2910559&_coverDate=08%2F02%2F2007&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000059127&_version=1&_urlVersion=0&_userid=2910559&md5=fdb188fe03849195110a1ab1c7aa7588
- [3] C. P. d. M. d. S. CPMS, "Lenguaje musical," 2006. [Online]. Available: <http://www.consersalamanca.org/programacion/lmusical.pdf>
- [4] I. M. H. Ayala, "Estructuras del lenguaje musical," *Universidad de Jaén*, vol. -, pp. 1–20, 2005.
- [5] S. Trehub, "The developmental origins of musicality," *Nat. Neurosci.*, vol. 7, pp. 669–673, 2003.
- [6] G. Cooper and L. Meyer, "The rhythmic structure of music," *The Rhythmic Structure of Music*, 1960, (Chicago: University of Chicago Press).
- [7] F. Lehrdahl and R. Jackendoff, "A generative theory of tonal music," 1983, (Cambridge, MA: MIT Press).
- [8] D. McHugh, "Musical listening apparatus with pulse-triggered rhythm," 2001, (US-A-6230047). [Online]. Available: <http://www.patentstorm.us/patents/6230047.html>
- [9] P. E. Oy, "Listen to your body," 2003, (EP-A-1431955). [Online]. Available: <http://www.patentoffice.ie/PDF%20Documents/2053.pdf>
- [10] L. X. Ribas and S. T. Vacchina, "Method for the musicalization of monitored phenomena," Method for the musicalization of monitored phenomena. Universitat Autònoma de Barcelona (pat. holder), 2006, patent no. 200602441 (pending). Spanish pat. office. Sept. 2006.
- [11] G. F. Salazar, *Electrocardiografía Elemental*. Editorial Científico-Técnica, 1987, ch. 2, pp. 17–27.
- [12] J. R. G. Gumà, "Utilidad segunda derivación (d2)," 2007, (Reunión).
- [13] M. T. Bonastre, "Reunión sobre las derivaciones de un ecg," 2007, (Reunión).
- [14] A. i. d. L. Bayés, *Fonaments d'electrocardiografia*, E. científico médica, Ed. Editorial científico médica, 1980, vol. 1.
- [15] R. F. Gallo, "El electrocardiograma en la clínica: una forma práctica para su análisis," *Publicación digital de la Ira Cátedra de Clínica Médica y Terapéutica y la Carrera de Posgrado de especialización en Clínica Médica*, vol. 1, p. 3, 2005, http://www.clinica-unr.com.ar/Educacion_distancia/Curso%20ECG%20en%20la%20Clinica%20-%20Modulo%201.pdf. [Online]. Available: http://www.clinica-unr.com.ar/Educacion_distancia/Curso%20ECG%20en%20la%20Clinica%20-%20Modulo%201.pdf
- [16] M. A. Orozco, R. M. Orozco, F. S. Ojeda, and G. D. Castellanos, "Extracción de características usando transformada wavelet en la clasificación de arritmias cardíacas," -, vol. -, pp. -, 2003.
- [17] R. Karthik, "Ecg simulation using matlab," 2006, (MATLAB Central). [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=10858&objectType=File>
- [18] P. E. McSharry, G. Clifford, L. Tarassenko, and L. A. Smith, "A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 289–294, March 2003. [Online]. Available: <http://www.physionet.org/physiotools/ecgsyn/paper/>
- [19] P. E. McSharry and G. Clifford, "Ecgsyn - a realistic ecg waveform generator," 2003. [Online]. Available: <http://www.physionet.org/physiotools/ecgsyn/C/src/>
- [20] W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*. Cambridge University Press, 2007, ch. Appendix C, p. 319, <http://www.nr.com/com/storefront.html>. [Online]. Available: <http://www.nr.com/com/storefront.html>
- [21] M. G. Peña, "Curso midi," 2003, escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- [22] C. Walshaw, "Abc notation," 2007. [Online]. Available: <http://www.walshaw.plus.com/abc/>
- [23] O. Bimber and R. Raskar, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters, 2005, ch. 1, pp. 1–13. [Online]. Available: http://www.amazon.com/gp/reader/1568812302/ref=sib_dp_bod_toc/002-8426009-5998437?ie=UTF8&p=S008#reader-link