

Uma Proposta para o Gerenciamento de Dados Musicais Utilizando Banco de Dados Relacional

William R. Ibiapina¹, José G. R. Maia¹, Ernesto T. Lima Neto¹,
Leonardo O. Moreira¹

¹Instituto Universidade Virtual (UFC Virtual)
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Fortaleza – CE – Brasil

`william.eti@alu.ufc.br,`

`{gilvanmaia,ernesto,leoomoreira}@virtual.ufc.br`

Abstract. *Musical data is widely disseminated or propagated in various applications worldwide, due to the overwhelming growth of online music repositories. With their semi-structured nature, storage and retrieval prove to be more difficult. Several researches in Music Information Retrieval (MIR) have emerged as strategies to improve access, storage, interpretation and generation of musical content. Seeking efficient ways of extracting information or querying into musical data still makes a challenge nonetheless. This paper features a proposal for managing musical data with storage and retrieval using relational database.*

Resumo. *Dados musicais são bastante disseminados ou propagados em diversas aplicações na rede mundial, devido ao crescimento esmagador de repositórios de música on-line. A natureza semiestruturada desses dados dificulta, principalmente, o processo de armazenamento e recuperação. Diversas pesquisas em Music Information Retrieval (MIR) têm surgido como estratégias para melhorar o acesso, armazenamento, interpretação e geração de conteúdos musicais. No entanto, pesquisar formas eficientes para extração de informações ou consultas em dados musicais ainda representa um desafio. Este artigo apresenta uma proposta para o gerenciamento de dados musicais com armazenamento e recuperação utilizando banco de dados relacional.*

1. Introdução

O amplo crescimento das aplicações multimídia levou a uma grande quantidade de dados não textuais para serem processados ou manipulados [Lo and Tsai 2009]. Esses dados, ao contrário dos tipos textuais e numéricos, incluem imagens, áudio, filmes, documentos e outros tipos. Em particular, a disponibilidade de música no formato digital continua a crescer em uma velocidade surpreendente [Cui et al. 2007].

Devido ao grande crescimento de repositórios de música on-line, as técnicas de armazenamento e recuperação de dados musicais estão recebendo cada vez mais atenção [Shen et al. 2006]. Como consequência, esse tópico tem atraído interesse representativo como oportunidade de pesquisa. Diversas técnicas estão sendo desenvolvidas para prover suporte automático a classificação ou reconhecimento de dados musicais baseados em algumas características, como instrumentos musicais, gênero musical, etc.

Music Information Retrieval (MIR) é considerada uma ciência de caráter interdisciplinar para recuperação ou extração de informação em uma música [Mrozek et al. 2016]. Pesquisas que se servem de MIR podem necessitar de conhecimentos de música, psicologia, processamento de sinal, estatística, aprendizagem de máquina, etc. Este campo de pesquisa tem originado desafios e aplicações, tais como sistemas de recomendação [Knees and Schedl 2013], separação de faixas, reconhecimento de instrumentos musicais [Han et al. 2017], similaridade [Uitdenbogerd and Zobel 1999], transcrição automática de música [Deb and Rajwade 2016], categorização automática [Wang et al. 2012], identificação de cantor [Liu and Huang 2002] [Shen et al. 2006] e geração de músicas [Evans et al. 2017]. No contexto de sistemas de recomendações, por exemplo, MIR tem sido utilizado em aplicações da Amazon, Google, Last.fm, Pandora e Spotify [McFee et al. 2012].

Os bancos de dados relacionais são modelos de armazenamento e recuperação de dados amplamente utilizados, inclusive nos anos recentes, em diversos sistemas como por exemplo os comerciais [Mrozek et al. 2016]. Além de sistemas comerciais, os bancos de dados relacionais são utilizados em diversos contextos como sistemas especialistas, redes sociais, sistemas geográficos, sistemas da área da saúde, sistemas científicos, etc. Um dos fatores de sucesso dos bancos de dados relacionais é modelo lógico, de definição simplificada, que se baseia na matemática. O modelo relacional emprega dois conceitos básicos: entidade e relação [Date 2003]. Para isso, o modelo relacional utiliza a estrutura de tabela onde se identificam os dados da entidade. Já a relação determina como cada registro de tabela se associa com outros registros de outras tabelas [Elmasri and Navathe 2015]. Ademais, a linguagem padrão para os bancos de dados relacional é a SQL (*Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada), também baseada em um modelo matemático e bastante conhecida como linguagem de banco de dados.

Bancos de dados musicais armazenam coleções musicais e fornecem um conjunto rico de capacidades para consultas destes dados [Cui et al. 2007]. As consultas permitem que os usuários recuperem dados a partir de parâmetros musicais, além de informações sobre objetos musicais, presentes nas músicas, em vários formatos e em diversos mecanismos. Existem duas formas amplamente utilizadas para recuperação de informação musical em banco de dados musical: consulta por texto e consulta por conteúdo [Cui et al. 2007]. As consultas por texto usam descrições textuais para rotular objetos musicais. Nesta forma, a recuperação é feita nos objetos em que os rótulos concordam com a consulta textual. O sucesso dessa forma de consulta depende, basicamente, da precisão do rótulo. No entanto, para grandes volumes de dados fica complicado rotular cada objeto musical. Já nas consultas por conteúdo são situações onde as consultas observam, por exemplo, trechos de uma música. Nesta forma de consulta, utilizam-se técnicas para encontrar, por exemplo, todos os objetos musicais que são de um gênero musical ou que trazem a presença de um determinado instrumento musical.

Com ampla utilização e adoção dos bancos de dados relacionais e a crescente disseminação de dados musicais pelos diversos repositórios *on-line* e aplicações, surge uma oportunidade de pesquisa em utilizar bancos de dados relacionais para o armazenamento e recuperação de dados musicais, utilizando as técnicas de MIR. Para isso, é necessário um estudo para a elaboração de estratégias de adaptação em um sistema de armazenamento/recuperação que foi projetado para dados textuais e numéricos. Neste

sentido, este trabalho tem como objetivo principal projetar um conjunto de adaptações para que os bancos de dados relacionais suportem o armazenamento e recuperação eficiente de dados musicais. Para validar a solução projetada, um conjunto de experimentos orientados a desempenho e integridade serão realizados para verificar se a solução agrega desempenho e confiabilidade em termos de armazenamento e recuperação de dados musicais.

2. Tecnologias para Manipulação de Dados Musicais

Esta seção apresenta algumas tecnologias para manipulação de dados musicais. Todas as tecnologias exploradas nesta seção estão disponibilizadas na forma de bibliotecas ou softwares para execução, extração e manipulação de objetos musicais. Na busca por bibliotecas ou softwares para gestão dos dados de objetos musicais, optou-se por elencar as bibliotecas ou softwares que suportam objetos musicais no formato de compressão de áudio MP3, um dos formatos de áudio mais populares e utilizados em diversas aplicações [Yang et al. 2012] [Castelan and Khodja 2015].

As tecnologias adotadas neste trabalho são:

Essentia¹ [Bogdanov et al. 2013] é uma biblioteca de código-fonte aberta, desenvolvida na linguagem C++ com suporte a vínculos com a linguagem Python, para análise de áudio e MIR. Consiste em uma vasta coleção de algoritmos que implementam funcionalidades de entrada e saída de áudio, processamento de sinais digitais, caracterização estatística de dados e vários descritores de alto nível. Seu foco é robustez de desempenho e otimização de algoritmo, incluindo velocidade computacional e consumo de memória. Apresenta suporte ao formato MP3 por meio de um algoritmo chamado *AudioLoader*, fornecendo informações como frequência do sinal de áudio, número de canais, *bitrate* e *codec* por meio do arquivo de entrada.

Marsyas² [Tzanetakis 2009] é um *framework* de código-fonte aberto para processamento de áudio, com ênfase em MIR, voltado para prototipação/experimentação rápida, síntese e análise de áudio. Foi projetado por George Tzanetakis, com ajuda de estudantes e pesquisadores de todo o mundo, no intuito de prover uma arquitetura flexível, geral e extensa que facilite a experimentação de algoritmos e proporcione alto desempenho. Seu suporte ao formato MP3 se dá pela importação das bibliotecas *libMAD* ou *LAME*, que requerem configuração em tempo de codificação para serem lidas. O Marsyas fornece dados como: número de canais, frequência do sinal e duração do áudio.

Madmom³ [Böck et al. 2016] é uma biblioteca de processamento digital de áudio, desenvolvida na linguagem Python, fortemente focada em MIR. Seus objetivos incluem facilidade de uso, prototipação rápida de fluxos de trabalho para processamento digital, conversão simples de um fluxo de trabalho para um programa executável e independência de softwares externos. Oferece suporte à biblioteca *FFmpeg* para manipulação de áudio com uso de um módulo próprio chamado *madmom.audio.ffmpeg*. O Madmom permite a identificação de dados como número de canais e frequência do sinal.

LibROSA⁴ [Brian McFee et al. 2015] é um pacote da linguagem Python para

¹<http://essentia.upf.edu/documentation/>

²<http://marsyas.info/>

³<https://madmom.readthedocs.io/en/latest/>

⁴<https://librosa.github.io/>

análise de áudio, fornecendo blocos de codificação necessários para criar sistemas de MIR. Suas utilidades incluem estimativa de tempo, separação de instrumentos de percussão, harmonia, processamento de áudio no domínio do tempo e segmentação estrutural. Oferece suporte a MP3 por meio de uma biblioteca externa chamada *audioread*, capaz de ler dados básicos do áudio, como duração, número de canais e frequência do sinal.

Os dados musicais mais recorrentes que podem ser obtidos a partir das tecnologias descritas nesta seção são:

- **frequência:** número de ciclos (ou oscilações) por unidade de tempo, calculado a partir da série temporal de um arquivo de áudio e recebido como um número real;
- **canais de áudio:** corresponde aos canais de comunicação de áudio, tradicionalmente categorizado pelo número de caixas acústicas usadas na reprodução das frequências sonoras. Os mais comuns são o monofônico (um canal), estereofônico (dois canais: direito e esquerdo) e o mais recente sistema Dolby Surround 5.1 (seis canais: frontal esquerdo, frontal direito, traseiro esquerdo, traseiro direito, central e baixo);
- **timbre:** indica a diferença entre dois sons que possuem a mesma frequência ou mesma nota, permitindo diferenciar sons de mesma frequência produzidos por instrumentos diferentes;
- **andamento (*tempo*):** a velocidade do compasso sonoro, é estimado a partir da série temporal de um arquivo de áudio. Seu retorno depende de como a estimativa é feita, podendo ser dado como um número real (andamento estático), um vetor de números (andamento dinâmico), ou plotado em um tempograma;
- **codec:** software que codifica ou decodifica dados de áudio digital, objetivando representar os sinais de alta fidelidade do áudio com a quantidade mínima de *bits*, preservando ao mesmo tempo a qualidade;
- **checksum:** informação específica de um arquivo de áudio usada para monitoramento de integridade de dados;
- **nota (*pitch*):** a nota musical que toca em determinado frame de um arquivo de áudio, pode ser extraída na forma de sua frequência fundamental ou um de seus harmônicos;
- **histograma de nota (*pitch histogram*):** representação gráfica da distribuição das frequências sonoras, plotada a partir do vetor de frequências;
- **classe de nota (*pitch class*):** conjunto de todas as notas separadas por um número inteiro de oitavas, pode ser plotado em uma representação gráfica;
- **duração:** é um valor no tempo que ilustra a duração total de um objeto musical, recebido como um número real;
- **gênero musical:** objetos musicais podem ser classificados quanto a um gênero quando compartilham elementos musicais em comum, são exemplos de gêneros musicais: *dance*, *techno*, *classic*, *reggae*, *calm*, *electro* etc;
- **ritmo:** indica o valor das notas musicais de acordo com a intensidade e o andamento, determinando a duração de cada som no objeto musical e também a duração dos silêncios. Pode ser recebido na forma de representação gráfica;
- **decomposição percussão-harmonia:** filtragem de frequências percussivas ou harmônicas de um arquivo de áudio, pode ser retornada na forma de uma nova série temporal ou de um novo arquivo de áudio.

A Tabela 1 apresenta as tecnologias que foram discutidas nesta seção e mostra quais dados podem ser obtidos por cada tecnologia. De posse dos dados que podem ser obtidos por cada tecnologia, um conjunto de consultas podem ser resolvidas servindo-se destes dados. A Tabela 2 lista um conjunto de consultas que podem ser respondidas pela utilização das tecnologias citadas nesta seção.

Tabela 1. Visão geral das tecnologias e quais dados podem ser obtidos

Tecnologia	Dados
Essentia	frequência, número de canais, timbre, andamento, <i>bitrate</i> , <i>codec</i> , <i>checksum</i> e nota.
Marsyas	frequência, número de canais, duração, timbre, histograma de nota, gênero musical e ritmo.
Madmom	frequência e número de canais.
LibROSA	frequência, número de canais, duração, timbre, andamento, decomposição percussão-harmonia e classe de nota.

Tabela 2. Exemplos de consultas a dados musicais

Consulta	Descrição
C1	<i>Quais as músicas em formato MP3 que são do gênero musical X e com duração superior a Y minutos?</i>
C2	<i>Quais as músicas em formato MP3 que não apresentam instrumento de percussão?</i>
C3	<i>Quais as músicas em formato MP3 que apresentam um andamento maior ou igual a X pulsos por segundo?</i>

3. Arquitetura Proposta

Esta seção descreve um projeto inicial de uma arquitetura de sistema proposta para permitir consultas a dados musicais por meio de um banco de dados relacional. A Figura 1 apresenta os componentes da arquitetura de sistema proposta, comentando as principais funcionalidades de cada componente e suas interações.

A *Interface com o Usuário* é responsável por fornecer ao usuário final um meio para armazenamento e recuperação de dados musicais. Pode ser implementada como uma *Application Programming Interface* (API) contendo um conjunto de classes e métodos, no paradigma orientado a objetos, para armazenamento e recuperação de dados musicais. Já o *Processador de Consultas* tem como objetivo principal receber as consultas formuladas pelo usuário final, por meio da *Interface com o Usuário*, e resolver as consultas se servindo dos *Arquivos de Metadados* e das *Tecnologias para Manipulação de Dados Musicais*.

As *Tecnologias para Manipulação de Dados Musicais* representam um conjunto de tecnologias semelhantes às citadas na seção 2. Para cada tecnologia adicionada no sistema, existe um código que faz a ligação entre os arquivos no formato MP3 e a obtenção dos dados musicais que são suportados pela tecnologia. O *Arquivos de Metadados* é representado como um esquema relacional que faz o mapeamento de cada tecnologia

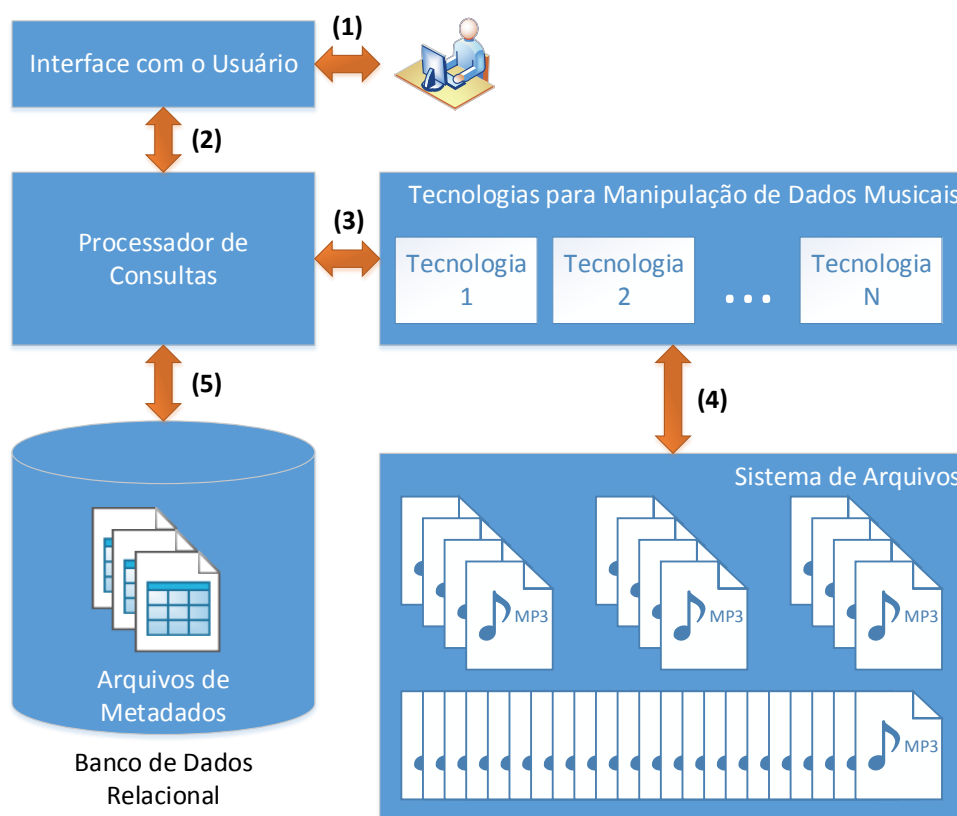


Figura 1. Arquitetura de Sistema

com um conjunto de dados musicais que pode ser obtido pela tecnologia. Além disso, o *Arquivos de Metadados* armazena dados estáticos que são frequentes nos arquivos em formato MP3, como frequência, duração, número de canais, autores, título da música etc. Neste sentido, o *Processador de Consultas* utiliza as informações no *Arquivos de Metadados* para saber qual tecnologia é utilizada para obter o dado requerido na consulta formulada pelo usuário final.

Os arquivos no formato de áudio MP3 ficam persistidos no sistema de arquivos, pois os bancos de dados no âmbito do modelo relacional foram projetados para manipular dados textuais e numéricos. Tais arquivos MP3 são manipulados em dois momentos: no armazenamento das músicas e na recuperação de dados musicais diante das consultas dos usuários. Durante o armazenamento de uma música, o arquivo MP3 passa pelo processamento de algumas tecnologias para extrair alguns metadados e armazená-los no *Arquivos de Metadados*. Alguns tipos de dados musicais, como a similaridade, devem ser resolvidos em tempo de execução da consulta. Neste sentido, os arquivos MP3 são manipulados novamente por meio de uma consulta por conteúdo. Assim, a arquitetura de sistema proposta suporta dois tipos de consultas: texto e conteúdo.

Em resumo, o fluxo principal do funcionamento da arquitetura proposta inicia-se com uma ação do usuário. A seta (1) representa a ação do usuário formulando uma consulta a dados musicais por meio da *Interface com o Usuário*. Já a seta (2) representa

a submissão dos dados da consulta para o *Processador de Consultas*. A seta (5) verifica quais dados musicais podem ser resolvidos por meio de consultas por texto aos metadados dos arquivos MP3 que estão armazenados no esquema relacional contido no *Arquivos de Metadados*. Por sua vez, a seta (3) realiza a ação das consultas por conteúdo aos arquivos MP3, por meio das tecnologias para manipulação de dados musicais, para extrair informações nos arquivos MP3 em tempo de consulta. Para cada dado musical existe uma tecnologia que extrair o dado musical do arquivo MP3 no sistema de arquivos, ação representada pela seta (4).

As consultas especificadas na Tabela 2 podem ser resolvidas pela arquitetura de sistema proposta e com a utilização das tecnologias para manipulação de dados musicais descritas na seção 2. Na consulta C1, tem-se dois atributos como critérios de seleção: gênero musical e duração. Dessa forma, de acordo com a Tabela 1, o Marsyas seria acionado para ler o arquivo de áudio MP3 e inferir o gênero musical, enquanto a duração poderia ser calculada pelo próprio Marsyas ou pelo LibROSA. A consulta C2 traz como parâmetro uma característica mais intrínseca, que é a instrumentação usada no áudio, podendo ser necessária uma filtragem antes do retorno da consulta. O LibROSA apresenta funcionalidades capazes de realizar tal filtragem. Por fim, a consulta C3, similar à C1, traz como critério de seleção uma comparação lógica de uma métrica específica, o andamento. Para extraí-la no processo de manipulação, temos como alternativas o Essentia e o LibROSA.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta inicial de uma solução, apresentada como uma arquitetura de sistema e direcionamentos de implementação, para o armazenamento e recuperação de dados musicais por meio de um banco de dados relacional. Para isso, foi apresentado um estudo inicial sobre o conceito de MIR, bancos de dados musicais, consultas a dados musicais e um levantamento de tecnologias de software livre que permitem a manipulação de dados musicais em formato de áudio MP3. Em seguida, foi mostrada e discutida uma proposta de arquitetura de sistema para suportar a solução proposta neste trabalho.

As pesquisas preliminares sobre as tecnologias de manipulação trouxeram dificuldades de codificação e implementação, devido à falta de ambientes integrados de desenvolvimento (IDEs) próprios ou que apresentem suporte a essas bibliotecas, sendo necessária a instalação direta pelo código-fonte. Os parâmetros de entrada e saída de cada tecnologia também são codificados e implementados de forma diferente e exigem manipulação de dados numéricos e representações gráficas.

Como trabalhos futuros, pretende-se: (i) implementar os componentes e interações propostas na arquitetura de sistema apresentada neste artigo; (ii) realizar uma avaliação da arquitetura proposta e implementada, resolvendo um conjunto maior de consultas a dados musicais em um *dataset* com uma variedade de dados musicais; (iii) explorar mais tecnologias para manipulação de dados musicais, objetivando ampliar uma maior possibilidade de consultas a dados musicais; (iv) adicionar suporte a outros formatos de áudio que não sejam o formato MP3; e implementar o suporte mais elaborado aos dois tipos de consultas (conteúdo e texto) comentadas em [Cui et al. 2007], objetivando avaliar qual a melhor forma de tipo de consulta para um dado musical.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com recursos do projeto **Uma Estratégia para Persistência de Dados Musicais em Banco de Dados Relacional**, conforme Edital 03/17 (PIBIC 2017/2018), da Universidade Federal do Ceará (UFC). Agradecemos também ao Grupo de Pesquisa em Computação em Nuvem e Sistemas (**IBITURUNA**) pela disponibilização da aplicação em sua infraestrutura.

Referências

- Böck, S., Korzeniowski, F., Schlüter, J., Krebs, F., and Widmer, G. (2016). Madmom: A new python audio and music signal processing library. In *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference*, MM '16, pages 1174–1178, New York, NY, USA. ACM.
- Bogdanov, D., Wack, N., Gómez, E., Gulati, S., Herrera, P., Mayor, O., Roma, G., Salamon, J., Zapata, J., and Serra, X. (2013). Essentia: An open-source library for sound and music analysis. In *Proceedings of the 21st ACM International Conference on Multimedia*, MM '13, pages 855–858, New York, NY, USA. ACM.
- Brian McFee, Colin Raffel, Dawen Liang, Daniel P.W. Ellis, Matt McVicar, Eric Battenberg, and Oriol Nieto (2015). librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python. In Kathryn Huff and James Bergstra, editors, *Proceedings of the 14th Python in Science Conference*, pages 18 – 25.
- Castelan, Y. and Khodja, B. (2015). Mp3 steganography techniques. In *Proceedings of the 4th Annual ACM Conference on Research in Information Technology*, RIIT '15, pages 51–54, New York, NY, USA. ACM.
- Cui, B., Liu, L., Pu, C., Shen, J., and Tan, K.-L. (2007). Quest: Querying music databases by acoustic and textual features. In *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Multimedia*, MM '07, pages 1055–1064, New York, NY, USA. ACM.
- Date, C. (2003). *An Introduction to Database Systems*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 8 edition.
- Deb, S. S. and Rajwade, A. (2016). An image analysis approach for transcription of music played on keyboard-like instruments. In *Proceedings of the Tenth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*, ICVGIP '16, pages 5:1–5:6, New York, NY, USA. ACM.
- Elmasri, R. and Navathe, S. B. (2015). *Fundamentals of Database Systems*. Pearson, 7th edition.
- Evans, B. L., MuneKata, N., and Ono, T. (2017). Using a human-agent interaction model to consider the interaction of humans and music-generation systems. In *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, HRI '17, pages 115–116, New York, NY, USA. ACM.
- Han, Y., Kim, J., Lee, K., Han, Y., Kim, J., and Lee, K. (2017). Deep convolutional neural networks for predominant instrument recognition in polyphonic music. *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech and Lang. Proc.*, 25(1):208–221.
- Knees, P. and Schedl, M. (2013). A survey of music similarity and recommendation from music context data. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 10(1):2:1–2:21.

- Liu, C.-C. and Huang, C.-S. (2002). A singer identification technique for content-based classification of mp3 music objects. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Information and Knowledge Management, CIKM '02*, pages 438–445, New York, NY, USA. ACM.
- Lo, Y.-I. and Tsai, L.-y. (2009). Real-valued feature indexing for music databases. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, ICUIMC '09*, pages 550–556, New York, NY, USA. ACM.
- McFee, B., Bertin-Mahieux, T., Ellis, D. P., and Lanckriet, G. R. (2012). The million song dataset challenge. In *Proceedings of the 21st International Conference on World Wide Web, WWW '12 Companion*, pages 909–916, New York, NY, USA. ACM.
- Mrozek, D., Socha, B., Kozielski, S., and Małysiak-Mrozek, B. (2016). An efficient and flexible scanning of databases of protein secondary structures. *Journal of Intelligent Information Systems*, 46(1):213–233.
- Shen, J., Cui, B., Shepherd, J., and Tan, K.-L. (2006). Towards efficient automated singer identification in large music databases. In *Proceedings of the 29th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, SIGIR '06*, pages 59–66, New York, NY, USA. ACM.
- Tzanetakis, G. (2009). Music analysis, retrieval and synthesis of audio signals marsyas. In *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimedia, MM '09*, pages 931–932, New York, NY, USA. ACM.
- Uitdenbogerd, A. and Zobel, J. (1999). Melodic matching techniques for large music databases. In *Proceedings of the Seventh ACM International Conference on Multimedia (Part 1), MULTIMEDIA '99*, pages 57–66, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, J.-C., Yang, Y.-H., Chang, K., Wang, H.-M., and Jeng, S.-K. (2012). Exploring the relationship between categorical and dimensional emotion semantics of music. In *Proceedings of the Second International ACM Workshop on Music Information Retrieval with User-centered and Multimodal Strategies, MIRUM '12*, pages 63–68, New York, NY, USA. ACM.
- Yang, R., Qu, Z., and Huang, J. (2012). Exposing mp3 audio forgeries using frame offsets. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 8(2S):35:1–35:20.