

Análise musical e informática — abordagens e oportunidades

J.N. Oliveira

Dept. Informática,
Universidade do Minho
Braga, Portugal

9 de Março 2013

Tardes de Matemática (SPM)
Biblioteca Lúcio Craveiro da Silva
Braga

Contexto

- **Informática** instala-se progressivamente no quotidiano.
- Informática na **arte** — apoio à produção de conteúdos, eg. filmes.
- **Composição** assistida por computador, ‘**computer music**’ etc — são bem conhecidas.
- Menos divulgado é o papel que a informática tem ou pode ter na **análise** do conteúdo musical.
- ‘Computer-aided Musicology’ — o tema desta apresentação.

Informática e Música

Que “Informática”?

Informática enquanto:

- fenómeno social (internet, **comunicação**, **desmaterialização**, **partilha**)
- **inteligência** artificial (antropomórfica)
- instrumento **estatístico** ('data mining')
- **ciência** da computação (automação, algoritmia e **álgebra** da informação)

Informática e Música

A “Lei dos 3 Ms” —
matemática, música,
mapas.

Abstracção é o
denominador comum.

Vasta **comunidade** de
informáticos ligados à
música.

Ao lado: órgão particular
de **Donald Knuth**,
célebre inventor do $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$.

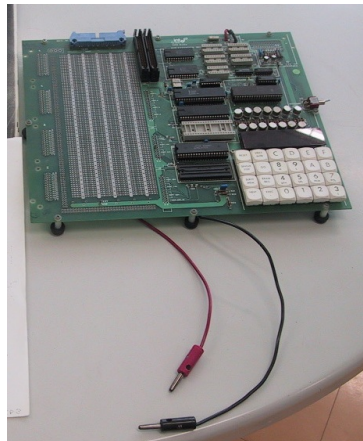


Informática e Música na UM

De volta a 1978/79

Em 1979 realizou-se no Parque de Exposições de Braga a JUVEMINHO 79.

O Laboratório de Electrónica da UM preparou várias demos, entre as quais a de um **interpretador de partituras** a várias vozes implementado num SDK85, uma placa da Intel usada nas aulas.



De volta a 1978/79

Foi preciso comprar 2Kb de memória adicional para o interpretador (escrito em assembler) poder correr.

O programa e as ‘partituras’ eram guardadas em fitas perfuradas — estas de acordo com um formato a que se viria a chamar, prosaicamente, MULA’80 (‘music language’80).

As fitas eram carregadas de uma *teletype* oferecida pelos CTT, da qual não havia informação nenhuma — teve que ser feita uma *interface* “a olho” ...

Feito completamente de raiz, o “sintetizador” amostrava uma sinusóide de 256 bytes calculada noutro computador, o **Wang** da D.Pedro V, pois o SDK85 não tinha aritmética de números reais.

De volta a 1978/79

A síntese teve que ser corrigida na própria exposição, pois notas da mesma frequência por vezes anulavam-se umas às outras...

Foi o que se observou na execução da *Air* da Suite BWV 1068 de J.S. Bach, uma das peças da demonstração:



Silêncio dos violinos — soma em oposição de fase dá 0 (!) e nada chega ao conversor DA...

Mais recentemente

Acolhimento de um “mirror” do **Projecto Mutoxia**
(<http://www.mutopiaproject.org/>) e colaboração na produção de conteúdos (Alberto Simões)

Arquivo (Digital) de Música Portuguesa (J.J. Almeida)

A partir de 2008/09:

- Disciplina **Informática para a Musicologia**
- **Licenciatura em Música da UM** (2007-)
- Ramo de **Ciências Musicais**
- Ênfase no trabalho cooperativo — plataforma **Wiki-score**
- Iniciação à “computer aided musicology”.

Informática para a Musicologia

Filosofia geral:

- Trabalho cooperativo — disciplina tem o seu próprio **Wiki**.
- **Wiki-score** (<http://www.wiki-score.org>) inicialmente desenvolvida para as **aulas práticas** da disciplina
- Recurso a ‘software’ de domínio público (‘**open-source**’) — mais acessível, mais flexível — eg. EasyABC, $\text{\LaTeX}$, VLC, Audacity (+SVN, Firefox, ...)
- Lição da comunidade ‘open-source’ — repositórios partilhados à **escala planetária** — milhares de colaboradores por projecto.
- Produção de conteúdos em larga escala — quem não conhece a **Wikipedia**?

O mundo mudou radicalmente na última década...

Exemplo — estes transparentes

Preparação e publicação do texto:

L^AT_EX — *monumental partilha de recursos via TUG (T_EX Users Group)*)

Textos musicais:

Notação ABC, preparação em EASYABC, arquivo na
Wiki-score

‘Clips’ audio:

Tratamento em Audacity, audição via VLC ou geração de MIDI

Formalização e transformação:

Haskell — exemplos mais à frente

etc

Para quê a Wiki-score

Para além do que já se disse:

Estímulo à recuperação de obras esquecidas (em particular portuguesas).

Transcrição cooperativa, em **larga escala** — ver eg. ópera **Demetrio a Rodi**, de C. Pugnani, com 41 x 28 unidades.

Plataforma preparada para "computer aided musicology".



The screenshot displays the WikiScore website interface. On the left, a sidebar features a large 'P3' logo and a list of categories: Cultura, Actualidade, Sociedade, Educação, Desporto, Política, Economia, Ciência, Ambiente, Media, Vícios, and Pquê?. Below these are 'OPTIMUS' and 'ALIVE12' logos. The main content area shows a musical score for 'P3' by Pugnani, Opus 1751-1759. The score is in G major and 3/4 time. It includes staves for Cornos in D (I & II), Flautas I & II, Clarinetes in Bb (I & II), Oboes I & II, Violinos I & II, Viola, and Cello. The score is presented in a clean, modern layout with a green header and a white background. The title 'WikiScore: Universidade do Minho criou uma "Wikipedia" para a música' is prominently displayed in bold black text. Below the title, a subtitle reads 'O conceito da WikiScore foi inspirado na Wikipedia e a ideia surgiu na disciplina de Informática para a Musicologia'. At the bottom, the text 'Texto de João Pedro Pereira • 15/06/2012 - 11:09' is visible.

WikiScore: Universidade do Minho criou uma "Wikipedia" para a música

O conceito da WikiScore foi inspirado na Wikipedia e a ideia surgiu na disciplina de Informática para a Musicologia

Texto de João Pedro Pereira • 15/06/2012 - 11:09

Para quê a **Wiki-score**

Sem informação não há **informática**; sem informação **partilhada** não há **ciência** fiável.

Método científico baseia-se na **repetição** arbitrária (por terceiros) da **experiência científica**.

Exemplo: a prova de um **teorema** em matemática é comunicada (partilhada) e verificada por outros matemáticos.

As Ciências Humanas baseiam-se no tratamento estatístico de fontes de dados — método científico pede que os dados estejam disponíveis (eg. na internet) para verificação por terceiros.

Wiki-score (assim como **Mutopia** etc) pretende ser um repositório aberto aos estudiosos da musicologia.

Music21

Um projecto semelhante ao da **Wiki-score**/UM é o

Music21/MIT (EUA)

Citando <http://mit.edu/music21>:

*Music21 is a Python-based toolkit for **computer-aided musicology**. Applications of this toolkit include computational musicology, music informations, musical example extraction and generation, music notation editing and scripting (...)*

Na UM temos usado Haskell onde o **Music21** usa Python.

Computer-aided musicology — o que é isso?

“Computer-aided musicology”

Abordagens

Música enquanto **linguagem** é susceptível de **formalização**, potenciando a sua **análise** assistida por **computador**.

Na sua versão mais simples, uma **linha melódica** é um habitante do monóide livre paramétrico em **eventos** musicais da forma (x, d) , em que x é uma altura de som e d é uma duração.

A operação $m \mathbin{++} n$ do monóide encadeia linhas melódicas.

Transformações “lineares” $f(m \mathbin{++} n) = (f\ m) \mathbin{++} (f\ n)$ **independentes** no eixo temporal (eg. **aumentação**, **diminuição**) e no eixo das alturas (eg. **transposição**).

Transformações “não lineares” mais frequentes são as que **seleccionam** eventos de acordo com **objectivos** da análise.

Exemplo — operações de selecção

Fonte:

Carnaval serrano
(Bolivia and Peru)

The image displays a musical score for 'Carnaval serrano' in 2/4 time. It consists of three systems of staves. The first system is labeled 'Anata I' and 'Anata II'. The second system is labeled 'A.I' and 'A.II'. The third system is also labeled 'A.I' and 'A.II'. Each system contains two staves, one for the upper part and one for the lower part. The notation includes various musical symbols such as notes, rests, and bar lines. A small icon of a speaker with sound waves is located to the right of the third system.

[*Flutes from the Andes*, Guillermo De La Roca. Epm Music
B000027YVO.]

Exemplo — operações de selecção

Se ao resultado da transformação anterior aplicarmos a remoção rítmica, $m' = \text{flat } (nrep\ m) =$



seguida de ordenação (sort) e de novo $nrep$, obteremos



isto é, calculamos a escala **pentatónica** da peça dada.

Pelas propriedades algébricas dos combinadores acima facilmente se verifica que

$$nrep (\text{sort } (\text{flat } m))$$

daria o mesmo resultado.

Aumentação e diminuição

Aumentação:



Diminuição:



Operação linear, cf. definição:

$$k *_d [] = []$$

$$k *_d [(x, n)] = [(x, k *_d n)]$$

$$k *_d (m \uparrow\uparrow n) = (k *_d m) \uparrow\uparrow (k *_d n)$$

Movimento retrógrado

Inversão da linha melódica, por exemplo



cf. *Variações Abegg*, op. 1 de R. Schumann (1810-1856).

O movimento retrógrado está codificado na terceira linha de

$$\text{retrog } [] = []$$

$$\text{retrog } [(x, n)] = [(x, n)]$$

$$\text{retrog } (m \uparrow n) = (\text{retrog } n) \uparrow (\text{retrog } m)$$

NB: $m \uparrow n$ não é comutativa.

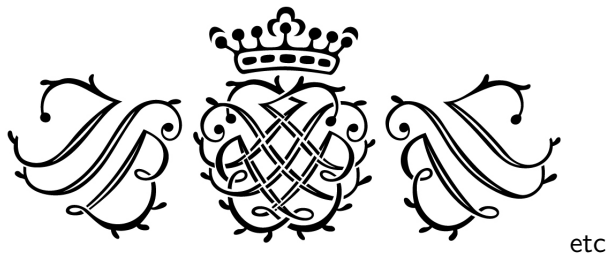
A propósito de “movimento retrógrado”

Olhe-se para o selo seguinte:



O que significa?

A propósito de “movimento retrógrado”



Nada mais que o selo de J.S. Bach (1685-1750), cujas iniciais ‘J’, ‘S’, ‘B’ se sobrepõem umas às outras “espelhadas” (ie. invertidas).

Bach fez a mesma construção na sua música, e muitos outros. Segue-se um exemplo conhecido.

Oferenda Musical

Canon a 2

(nr.1 of Canones diversi super thema regium, BWV 1079)

J.S. Bach (1685-1750)

The image displays a musical score for "Canon a 2" by J.S. Bach, BWV 1079. The score is written for two voices (Soprano and Alto) in C minor, 3/4 time. It consists of five systems of two staves each. The first system shows the beginning of the piece with a treble clef and a key signature of three flats. The subsequent systems show the development of the canon, with the second voice entering in the second measure of each system. The score ends with a double bar line in the fifth system.



Oferenda Musical

Nitidamente, há duas **unidades** neste cânone — o Tema Real,

a =



e a **resposta** de Bach:

$$b =$$


Oferenda Musical

A estrutura do cânone expressa na suas unidades a e b ,

a	b
$retrog\ b$	$retrog\ a$

é captada algebricamente pela expressão

$$(a \parallel retrog\ b) \uparrow\uparrow (b \parallel retrog\ a)$$

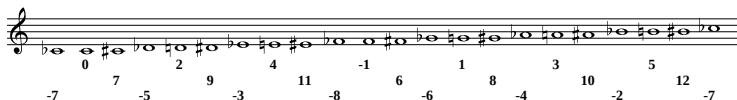
equivalente a

$$(a \uparrow\uparrow b) \parallel retrog\ (a \uparrow\uparrow b)$$

em que o novo operador $m \parallel n$ faz executar m e n ao mesmo tempo (polifonia).

Representação das notas de música

Outra operação linear é a **transposição**, requerendo uma representação numérica **injectiva** (não enarmónica)



que garante a transposição por simples subtracção:



-3 =



$n + 1$ (resp. $n - 1$) significa uma quinta acima (abaixo); distância entre notas enarmónicas: 12 unidades.

Representação linear de tonalidades

Facilmente se vê que cada nota é representada pelo número de acidentes da respectiva tonalidade maior, convencionando números negativos para bemóis e positivos para sustenidos.

Exemplos: *re maior* = +2 (sustenidos), *si bemol maior* = -2 (bemóis).

Cada intervalo é obtido pela diferença entre as respectivas representações, eg.

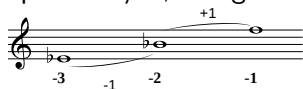


Assim, uma 2.a menor (-5) é diferente de um meio tom cromático (7), etc ¹

¹Ver: *MuseCode: à procura da linearidade na música tonal*, do colega J.C. Ramalho (Palácio Vila Flor, Guimarães; 2012; 03.23;).

Tonalidade clássica

Nitidamente, a progressão pelo “ciclo” das quintas é a ordem da representação, cf. eg. a relação **tónica-dominante-subdominante**:



captada pela “derivada” $-1, 0, +1$.

Donald Tovey ²:

*(...) it is an undisputed fact that modulations in a **dominant** direction $[+1]$ have an effect of **action**, while modulations towards the **subdominant** $[-1]$ have an effect of **retirement**.*

Temos assim uma **escala** para medir a **derivada tonal** de uma obra musical.

²Harmony, Musical Art. from the Ency. Brit., OUP 1944.

Exemplo — forma sonata

Exemplo de questão de investigação:

*Em que medida é o arquétipo tonal da **forma sonata**, típica do classicismo europeu, seguido “de facto” pelos compositores desse período?*

*Mais ainda: terá tido cada compositor a sua **gramática tonal**?*

*Qual a frequência de **padrões de modulação** na música tonal?*

Recorrendo à escala tonal numérica, estas questões reduzem-se a problemas de reconhecimento de **padrões** (“motifs”) em ‘data mining’.

Reconhecimento de *motifs* em séries numéricas

Ocorrência de 3 diferentes *motifs* encontrados em ECGs:

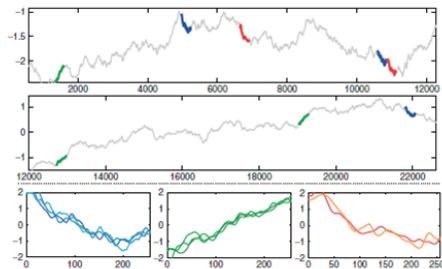


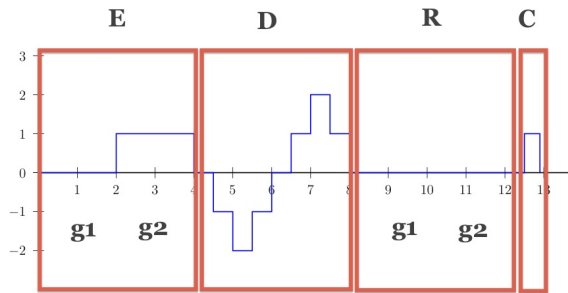
Fig. 1 Example of a time series with several motifs. Above: in its original context; below: detail of each motif. Blue and green: three instances; red: two instances. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

Ver *Significant Motifs in Time Series* dos colegas N. Castro e P.J. Azevedo ³.

³In Statistical Analysis and Data Mining, Volume 5, Issue 1, pages 35–53, February 2012, John Wiley and Sons.

Forma sonata

Arquétipo (discutível...)



onde

Exposição

Desenvolvimento

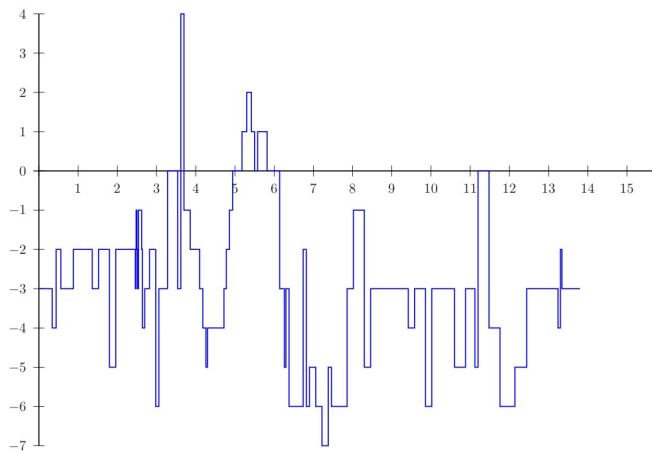
Recapitulação

Coda

g1 — grupo temático 1

g2 — grupo temático 2

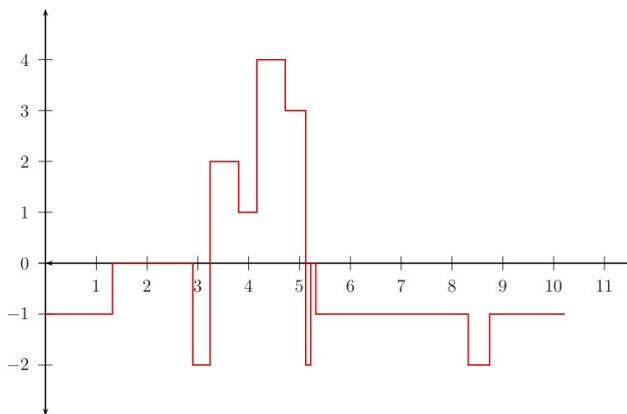
Forma sonata — op55i (Eroica)



Autêntica **turbulência** tonal!

(1x = 50 compassos)

Forma sonata — op68i (Pastoral)



Estabilidade tonal.

(1x = 50 compassos)

Sistema tonal — “key relationships”

Mesmo na op68i, transições entre blocos tonais estáveis ultrapassam a “derivada” $-1, +1$ convencional, sendo particularmente frequentes saltos de 4 no ciclo das quintas, cf. eg.



com “derivada” $-4, +4$.

Donal Tovey ⁴:

To move from a major tonic to (...) VI $\flat$ is to pass into deep and warm shadow. (...) The converse relations III $\sharp$ and VI $\sharp$ from a minor tonic are very bright.

Modulações do tipo $-2 \rightarrow +2$ e $+2 \rightarrow -2$ parecem ser um ‘motif’ na **gramática tonal** de Beethoven — exemplos nos próximos slides.

⁴Op.cit.

Modulação $+4 = (-2 \rightarrow +2)$

Pastoral (op68i, mm.162–163):

Op.68i, mm.160-164

Oboe I
Violino I
Violino II
Viola
Violoncelli
Bassi

cresc. poco a poco - -

Bb (I) D(I)



(Marcha harmónica de largas proporções.)

Modulação $-4 = (+2 \rightarrow -2)$

Quarteto op18.5iii, mm.97-100



Violino I
Violino II
Viola
Cello

The score shows a modulation from D major to B minor. The first system (mm. 97-98) is in D major. The second system (mm. 99-100) is in B minor, indicated by the key signature change and the natural sign on the F# in the Cello part. The strings play a rhythmic pattern of eighth notes. The Violino I and II parts have first and second endings marked with '1' and '2'.



Concerto op61i, mm.23-30



Ob.I
Ob.II
Vl. I
Vl. II
Vla.
Vc e B.

The score shows a modulation from D major to B minor. The first system (mm. 23-24) is in D major. The second system (mm. 25-26) is in B minor, indicated by the key signature change and the natural sign on the F# in the Cello part. The strings play a rhythmic pattern of eighth notes. The Violino I and II parts have first and second endings marked with '1' and '2'. Dynamics include *f*, *pp*, and *ff*.



op125iii

A estrutura tonal do andamento op125iii (IX sinfonia) é particularmente elucidativa:

op125iii

The musical notation shows a sequence of pitch classes on a staff with a key signature of one flat. Above the staff, intervals of +4 and -4 are marked between groups of notes. Below the staff, the pitch classes are labeled with numbers: -3, -2, -1, +1, -3, -7, -2, -3, -2, -5, -2. Below these numbers, the labels T1, T2, T1, T2, T1, -, -, -, T1, T1, T1, -, -, - are aligned with the corresponding pitch classes.

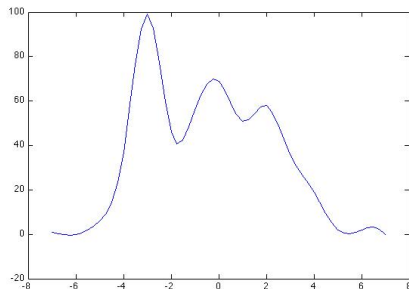
Ao centro identifica-se um padrão que sugere um sistema tonal $-4, 0, +4$ que divide a oitava em 3 partes iguais, cf.

The musical notation shows a sequence of pitch classes on a staff: 1, 1/3, -3, 1/3, -7, 1/3, 1. The intervals between these pitch classes are indicated by numbers below the staff: 1, 1/3, -3, 1/3, -7, 1/3, 1.

Este padrão ocorre frequentemente em obras em $Mi\flat$ maior — veja-se eg. o concerto op73, etc.

A propósito

A escolha tonal de Beethoven (em número de andamentos):



Distribuição “normal” centrada em 0 (Dó maior, Lá menor), fortemente perturbada pelo “pico” em -3 : tonalidades de Dó menor e Mi $\flat$ maior.

Outros exemplos

O que torna "jazzística" a música?

As funções que transformam, por exemplo, a Bourrée BWV 996 nr.5 de J.S. Bach



na obra homónima dos Jethro Tull (1969):



Novos combinadores

Para padrões específicos, por exemplo o de Caplin ⁵,

The image displays a musical score for a piano piece, specifically focusing on four variations of a harmonic pattern. The score is written in G major (one sharp) and 4/4 time. It consists of two systems of staves. The first system contains (a) presentation and (b) continuation. The second system contains (c) fragmentation and (d) cadential. Each variation shows a different way of presenting or developing a specific harmonic idea, often involving triplets and specific chord progressions. The notation includes treble and bass clefs, key signatures, and various musical symbols like notes, rests, and dynamic markings (ff, p).

(a) presentation

(b) continuation

(c) fragmentation

(d) cadential



(op2.1i de Beethoven), defina-se eg.

data *Caplin m* { *present :: m, cont :: m, frag :: m, cad :: m* }

a usar directamente na codificação da fonte.

⁵W.E. Caplin: *Harmonic variants of the Expanded Cadential Progression* in *A Composition as a Problem II*, Tallinn 1999.

Novos combinadores

Ou então criar anotações sobre uma fonte textual convencional e extraí-las mais tarde, eg. (notação **ABC** usada na Wiki-score):

```
% presentation
.F.A.c.f | (a3/2(3g/4f/4=e/4.f) z | \
% continuation
.G.c.=e.g | (b3/2(3a/4g/4f/4.g) z | \
% fragmentation
({A}a3/2(3g/4f/4=e/4.f) z | \
({B}b3/2(3a/4g/4f/4.g) z | \
% cadential
!ff!!arpeggio![cfac']2b/a/g/f/ |\
!p!{=efg}f-e !fermata!z x \
```

Ou ainda, detectar a **semelhança** musical com base em algoritmos de **alinhamento** de sequências típicos da engenharia genética, ver próximos slides.

Alinhamento de seqüências

Correlação entre o nr.65 da BWV 244 de J.S. Bach (ária *Mache Dich, Mein Herze, Rein*),



Alinhamento de seqüências

... e o tema do filme *Le Repos du guerrier* de Michel Magne (1930-1984)

Le Repos du Guerrier
(Cent mille Chansons)

Michel Magne (1930-1984)



— popularizado por Frida Boccara (1940–1996) como a canção *Cent mille Chansons*.

Alinhamento de sequências

O algoritmo produz vários **alinhamentos** entre as duas sequências melódicas, em particular:

J.S. Bach versus M. Magne

The image displays two musical staves in 12/8 time, both in B-flat major. The top staff contains the notes F, G, A, and B. The bottom staff contains the notes A, B, E, A, B, D, A, B, C, E, D, and C. The notes are aligned to show similarities between the two sequences. For example, the F in the top staff aligns with the A in the bottom staff, and the B in the top staff aligns with the B in the bottom staff. There are also gaps in the alignment, such as the G in the top staff aligning with the E in the bottom staff, and the A in the top staff aligning with the D in the bottom staff.

(*) mind the gap

(*)



Será isto suficiente para considerarmos que a peça de Magne foi inspirada pela referida ária, como já foi sugerido?

Sumário

A análise musical apoiada por computador tem essencialmente duas alternativas:

- **Algébrica** — representação do texto musical recorrendo a operadores que “reflectem” — por construção e opção do criador do conteúdo — a sua análise.
- **Estatística** — anotação das fontes com informação adicional cuja extracção e ‘data mining’ conduz ao resultado analítico.

Dada a dimensão do esforço necessário à extracção de tal conhecimento é preciso identificar uma comunidade focada nestes objectivos.

Equipas de investigação devem ser mistas — **musicólogos** + **informáticos** — até ao dia em que, por formação (IPM?), os primeiros sejam “**data scientists**” em música.

Data Scientist?

Num artigo recente, Davenport e Patil declaram a profissão de **"data scientist"** como a mais promissora do século XXI ⁶.

A profissão é a de fazer **descobertas** no mundo da **'big data'**, mostrando que as empresas já estão a lidar com informação de **volume** impensável há anos.

A profissão pede **criatividade** acrescida a uma formação sólida em **matemática, estatística** etc.

Existindo já a tecnologia, nada impede as **ciências humanas** de trabalhar da mesma forma.

Qual o problema, então?

⁶T. Davenport, D. Patil, Data scientist: The sexiest job of the 21st century, Harvard Business Review (Oct 2012).

Big data?

Comentário do Prof. Barry Cooper (Univ. Manchester), editor e autor de *The Beethoven Compendium, T&H 1991*:

On Feb 14, 2011, at 12:53 PM, Barry Cooper wrote: (...) I'm not sure that I can be of much help with your project, which sounds **impossibly huge** if you want to record all tonal events in all Beethoven's music. (...) I'd also be interested to hear of any new insights that emerge from your **novel approach**.

A questão é: o que significa **impossibly huge** nos dias de hoje?

A lição da Wikipedia

Citando <http://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:About>:

*Wikipedia is written **collaboratively** by largely **anonymous** Internet **volunteers** who write without pay. (...) Anyone with Internet access can write and make changes to Wikipedia articles*

Since its creation in 2001, Wikipedia has [gone as far as] attracting 470 million unique visitors monthly as of February 2012.

(...) There are more than 77,000 active contributors working on over 22,000,000 articles in 285 languages.

(Já assim é, há muitos anos, na comunidade 'open-source')

A lição das universidades e dos arquivos

Citando Dick K.P. Yue, MIT School of Engineering:

The idea is simple: to publish all of our course materials online and make them widely available to everyone.



O esforço de publicações de fontes (facsimile) é notável em Portugal, por exemplo o fundo musical da Biblioteca Nacional.

Uma “spin-off” do Dep. de Informática da UM é hoje líder na área da arquivística digital:



'Big data' em musicologia

A produção de conteúdos não proprietários requer a identificação de uma **comunidade** que partilhe um interesse comum.

Papel dos **amadores** não deve (não pode!) ser menosprezado — veja-se eg. o portal interactivo da **Fundação Gulbenkian** para inventariação de património português espalhado pelo mundo (<http://www.hpip.org>).

Especialistas devem ser garante da certificação final dos resultados.

... SE O MUNDO MUDOU, TODOS TEMOS QUE MUDAR TAMBÉM ..