

André Rangel Macedo
Doutorando em Ciência e Tecnologia da Arte,
Universidade Católica Portuguesa, 2009

Espectros Audível e Visível - proposta de correspondência

Resumo:

Apresentação de uma proposta de correspondência entre Cor e Música. A proposta é exemplificada materialmente através de um novo hiper-instrumento que dá aos utilizadores o controlo sobre uma composição algorítmica multi-sensorial gerada em tempo real. São apresentados também com algum detalhe a metodologia e o modelo matemático utilizados, que pretendem ser matéria e referência para futuros desenvolvimentos no campo da composição multi-sensorial.

Palavras chave:

Espectro visível, espectro audível, sinestesia, composição multi-sensorial, tempo real, cor, música, composição interactiva, composição algorítmica, arte generativa, hiper-instrumento, interface, meta-concepção.

Introdução

Desde sempre os sentidos audição e da visão coexistiram nos seres humanos. De acordo com investigadores, os recém nascidos compreendem todas as suas impressões sensoriais como um todo, não diferenciam a luz, do som, do gosto ou olfacto (Campen 2008), e só por volta dos quatro meses de idade com o desenvolvimento neuronal e social é que se começam a modularizar os sentidos. Paul Hertz (Hertz 1999), considera os trabalhos que fundem dois ou mais sentidos como Arte Sinestésica, três décadas antes, Dick Higgins(Higgins 1965) já cunhara o termo Arte Intermedia para descrever processos de composições multisensoriais que cruzam ou fundem os limites entre diferentes media criando estruturas partilhadas. Correspondências entre os media são normalmente arbitrarias, condicionadas apenas pelas nossas práticas culturais e preferências psicológicas. Várias foram as propostas de correspondência entre cor e música nos últimos 3 séculos mas, quase sempre, os sistemas criados, basearam-se na escala musical ocidental de doze meios tons. Possivelmente porque na cultura ocidental, a

escala musical é constituída por 7 notas musicais e 7 é também vulgarmente considerado como sendo o número de cores do arco-íris.

Este estudo propõe uma relação e um sistema de correspondência entre Luz (Cor) e Som (Música) justapondo o espectro de frequências audíveis e o espectro de frequências visíveis através de uma modelação matemática. Para tal, converteram-se os valores de frequência de onda de 28 Hz a 4 KHz (aproximadamente o espectro de frequências fundamentais da tessitura de um piano) para valores de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm. Sincronizando os acontecimentos sonoros (Musicais) e visuais pretende-se potenciar e motivar processos de concepção orientados simultaneamente a pelo menos dois sentidos: a audição e a visão. Para demonstrar esta correspondência foi desenhado e produzido um hiper-instrumento que permite a qualquer utilizador finalizar um processo de composição algorítmica interactiva.

A composição intermedia (entre os media), multisensorial, que cruza conhecimento sistematizado das Artes Musicais e Visuais, com conhecimentos científicos das áreas da física de som e da luz, contribui para a compreensão das emergentes transformações e interacção entre as Artes, Ciências e Tecnologias. Hoje os media podem ser descritos por abstracções matemáticas e representados em formatos digitais, assim, a sintaxe da composição intermedia pode ser construída por uma linguagem de programação. "Implementando estruturas composicionais altamente complexas entre os media, os computadores oferecem a possibilidade de controlar e sincronizar diferentes media". (Hertz 1999).

O texto que se segue está estruturado em cinco secções. Primeiro são comparadas as representações do som e da luz nos domínios espacial e temporal. Segue-se a apresentação de conceitos elementares de algoritmia associada à composição musical. De imediato apresentamos o cerne deste artigo que é a proposta de correspondência entre cor e música. Na secção

seguinte, descrevemos o hiper-instrumento desenhado para demonstrar a nossa proposta de correspondência, e apresentamos alguns detalhes das metodologias utilizadas na sua materialização. A última secção apresenta a relação dos utilizadores/espectadores com a composição multi-sensorial enquadrando este trabalho no campo da meta-concepção.

Espectro audível e Espectro visível

Os acontecimentos sonoros e luminosos são fenómenos de transporte de energia estudados simultaneamente pela física. Ambos se propagam através de ondas, mecânicas longitudinais no caso do som e electromagnéticas transversais no caso da luz [1]. As ondas sonoras necessitam de um meio material para se propagarem mas as ondas electromagnéticas como a luz podem propagar-se no vazio. Ambas necessitam de um espaço de tempo entre a sua emissão e a sua recepção. No ar, o som propaga-se a uma velocidade de 344 m/s e a luz a uma velocidade 300 000 000 m/s. As ondas sonoras perceptíveis pelo ouvido humano oscilam aproximadamente entre os 20 Hz e os 20 KHz com comprimentos de onda entre os 17.15 e os 0,0172 m, já as ondas electromagnéticas perceptíveis pelo olho humano oscilam entre os 430 THz e os 750 THz com comprimentos de onda entre os 740 e 380 nm. Apesar das enormes diferenças de grandeza e velocidade, tanto as ondas sonoras como as ondas electromagnéticas são representadas pelo comprimento de onda e frequência. É intrigante o facto de quase sempre se representar o espectro sonoro no domínio das frequências e o espectro visível no domínio dos comprimentos de onda dado que frequência e comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais.

Composição algorítmica

Algoritmo tem origem na matemática, no processo de resolução de um problema "é uma receita passo a passo para atingir um objectivo específico" (Cope 2007). Um exemplo clássico é o algoritmo Euclideano – processo utilizado para encontrar o máximo denominador comum de dois números. O resultado é o mesmo quer o processo seja executado por um computador ou por uma pessoa. Assim, um algoritmo consiste em regras, operações, memória, e usualmente computadores, entradas e saídas. As operações transformam os valores das memórias, das entradas e das saídas. As regras definem que operações executar, dependendo das condições nos valores das entradas e memórias. Algoritmos são fundamentalmente determinísticos, finitos e

não conhecem nem fazem escolhas aleatórias. Mas a aleatoriedade pode ser simulada, ou o programa pode ter uma ramificação para a realidade externa de forma a introduzir aleatoriedade no algoritmo.

O poder dos computadores eliminou o penoso trabalho de execução de certos algoritmos, deixando os humanos livres para se focarem na parte criativa do trabalho, nomeadamente no processo que é o algoritmo. Se podemos descrever exhaustivamente um sistema numa folha de papel, esse sistema pode ser incorporado, implementado num computador. Algoritmos podem ser escritos em qualquer linguagem, para serem compreendidos por um computador, tem de ser expressos numa linguagem computacional. O computador tornou-se um meio muito eficaz e conveniente para implementar algoritmos com grande rapidez. Um computador ligado às máquinas apropriadas, pode executar instruções para tocar música, desenhar, etc. Hoje os artistas audiovisuais têm tecnologia para compor trabalhos algorítmicos. Artistas algorítmicos também conhecidos por algoristas, são aqueles que introduzem e controlam algoritmos originais no seu trabalho de criação (Verstko 1999).

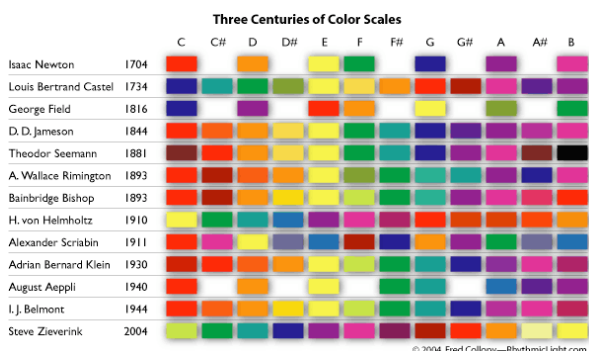
Processos algorítmicos geradores de formas artísticas gozam de uma longa e venerável tradição. Os exemplos incluem a partitura do compositor, o plano do arquitecto e as anotações do coreógrafo de dança. Ao considerar os compositores mais importantes na história da música algorítmica, David Cope, refere Guillaume Machaut, no século XIV, J. S. Bach, F. J. Haydn, W. A. Mozart no século XVIII e A. Webern, P. Boulez e J. Cage no século XX. Alpern (Alpern 1995) considera composição algorítmica como composição automatizada e destaca como pioneiros da composição algorítmica assistida por computador Lejaren Hiller, Leonard Isaacson, Robert Baker e Iannis Xenakis.

Do passado até à actualidade, existem três abordagens principais à composição algorítmica computadorizada: algoritmos para síntese sonora; algoritmos para estrutura composicional; e algoritmos para correlação da síntese sonora com a estrutura composicional. A nível processual e metodológico, Burns (Burns 1996) identifica cinco tipos de algoritmos: estocástico, caótico, baseado em regras, gramatical e inteligência artificial. A composição algorítmica interactiva possibilitada pelo hiper-instrumento que agora apresentamos integra simultaneamente metodologias estocásticas e baseadas em regras como será explicado adiante neste texto.

Música e Cor

Ao longo dos tempos vários foram os modelos e dispositivos que visaram a performance em tempo real de eventos visuais e sonoros. De acordo com Golan Levin (Levin 2000) o sincronismo de imagens e sons é variavelmente conhecido como música ocular, música visual, música colorida ou música para os olhos. Na sua tese de mestrado, Levin analisa e lista algumas das tentativas mais relevantes ao longo da história no sentido de relacionar som e imagem começando pelo "Ocular Harpischord" de Bertrand Castel (1688 - 1757) considerado o dispositivo mais antigo para a performance de música visual.

Figura 1 - Corresponências entre cor e música.



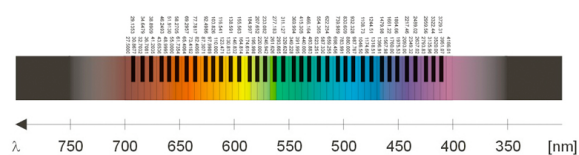
De todas as correspondências possíveis entre música e cor, o mapeamento das notas ou alturas musicais para tonalidades de cor foram a proposta mais comum ao longo dos últimos 300 anos. Ao observarmos a tabela de escalas de cores (figura 1) constatamos que frequentemente, as propostas fazem corresponder cores do espectro visível aos doze meios tons que constituem uma oitava da escala diatônica. Newton, através de uma abordagem especulativa, em 1704, alinha o espectro por uma escala diatônica (Collins, 2007). Em 1734, Louis-Bertrand Castel empreendeu claramente um alinhamento mais aleatório, e simétrico do de Newton entre as notas Dó e Sol. Castel mantém o amarelo no Mi e troca o vermelho e o azul do Dó e do Sol acrescentando os valores cromáticos intermédios para obter uma escala cromo-musical com 12 níveis. Field, em oposição a Newton (Silvestrini, Fischer 1999), baseou a sua proposta nos estudos de Moses Harris sobre as descobertas de Jacques Christophe Le Blon que observou ser possível representar "todas" as cores a partir da mistura das cores pigmento azul, vermelho e amarelo. Field também relacionou o brilho da luz com o amarelo, a escuridão com o

azul e um estado intermédio com o vermelho. Na escala cromo-musical que propôs, além do azul, vermelho e amarelo, utilizou mais três cores secundárias resultantes da mistura de pares das três primeiras.

As escalas cromo-musicais propostas entre 1844 e 1893, alinharam novamente, com ligeiras variações, o espectro por uma escala diatônica. Helmholtz e Scriabin quebram novamente com esta tendência. Helmholtz ao alinhar as cores que considerava primárias na síntese aditiva da cor (vermelho, verde e azul-violeta) pelas notas do acorde de Lá maior e Scriabin ao propor uma escala considerada como resultante da influência da sua sinestesia. No final do século XX, outro nome incontornável do estudo das associações possíveis entre cor e música é Jorge Antunes (1982) que propôs a tabela "cromofônica" que faz corresponder às notas musicais frequências do espectro visível de forma bastante detalhada (ver anexo 3).

Considerando que o piano é o instrumento tradicionalmente utilizado no processo de composição e que além disso é de todos os elementos da orquestra clássica aquele que produz o mais largo espectro de alturas musicais, decidiu-se torná-lo como referência nesta demonstração. A correspondência entre cor e frequência sonora que propomos obteve-se recorrendo ao modelo matemático que melhor se ajustou para converter o espaçamento exponencial dos intervalos entre as frequências fundamentais das notas compreendidas na tessitura de um piano em espaçamento linear dos comprimentos de onda do espectro electromagnético visível. A figura 2 ilustra graficamente esta correspondência.

Figura 2 - Correspondência proposta neste estudo.

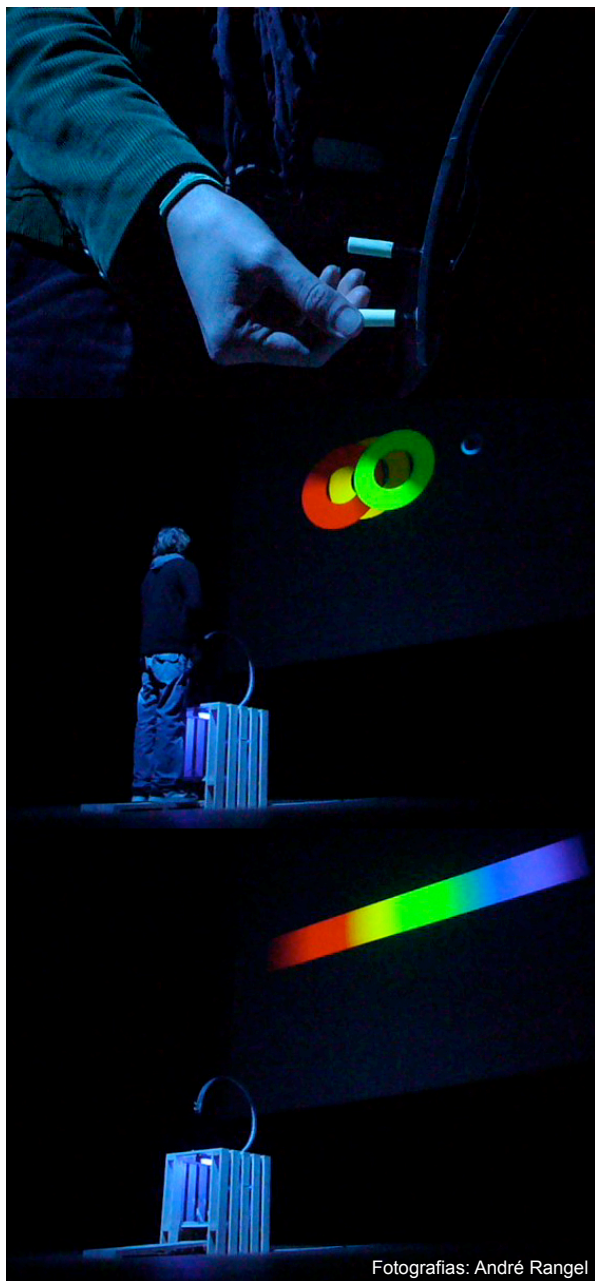


O Hiperinstrumento

Tod Machover (Machover 1992) propõe o termo hiper-instrumento para definir ferramentas, resultantes da pesquisa tecnológica no campo das artes, que transcendem os limites tradicionais de amplificação da gestualidade humana. Como sistemas, estimuladores e facilitadores do processo criativo, combinam os papéis tradicionais do performer e do compositor com o

poder computacional da máquina. Tod considerou-os instrumentos musicais do futuro que, visando a expressividade aumentada, redefinirão a própria expressão musical.

Figura 3 - O hiper-instrumento Colmus.



Para demonstrar a correspondência que propomos, foi desenhado e produzido o Hiper-instrumento Colmus (Figura 3) resultado de um processo de composição multisensorial que pretende implicar simultaneamente os sentidos

da audição, da visão e do tacto dos utilizadores/performers. Esta composição vive de contrastes: integra simultaneamente meios digitais e meios analógicos; *hardware* comercial e *hardware* *customizado*; merge tecnologias *low-tech* mecânicas e tecnologias *high-tech* digitais e electrónicas; combina materiais simples como madeira e ferro com *software* na forma de aplicação original totalmente *customizada*.

O primeiro passo na programação da aplicação foi implementar o algoritmo que permite fazer corresponder valores "RGB" (dimensão standardizada a quase todos os dispositivos electrónicos de apresentação de imagem) para cada valor de comprimento de onda do espectro visível. Não sendo fisicamente possível um correspondência exacta, implementou-se uma aproximação baseada nos conhecimentos científicos actuais. A metodologia, implica dois momentos distintos: primeiro conversão dos valores de comprimento de onda electromagnética para valores do modelo de cor tridimensional CIE XYZ (Gernot 2000) utilizando a tabela de conversão disponível como anexo 2; segundo conversão dos valores CIE XYZ para valores RGB utilizando a fórmula de conversão disponível como anexo 3. Implementada esta primeira fase da programação e utilizando o modelo matemático que desenvolvemos (ver anexo 4) para converter os valores entre 27.5 Hz a 4,186.01 Hz para valores entre 700 nm e 400 nm, a aplicação permitiu, fazer corresponder à frequência fundamental de cada nota da tessitura do piano os valores RGB correspondentes.

O passo seguinte focou essencialmente o desenho do algoritmo simples que gera e calcula em tempo real a estrutura da composição. Este algoritmo foi implementado utilizando simultaneamente metodologias estocásticas e baseadas em regras de forma a introduzir contraste também na composição. Contraste e repetição que são, segundo Roy Bennett, os dois ingredientes básicos do projecto e forma musical (Bennett 1982). A existência de algum grau de repetição em toda música é uma das suas propriedades globais (Leach and Fitch 1995) assim, a performance desta composição generativa acontece em "loop", repetindo-se no final de cada 10 compassos. Repetem-se também os intervalos entre as notas que compõem os acordes de uma cadência perfeita, mas em tempo real, são transpostos individualmente através da soma ou subtracção aleatória de 12 meios tons. Outra das regras nesta composição é a ocorrência de variações

rítmicas durante a sua performance, por exemplo no início do primeiro compasso são escolhidas aleatoriamente entre 1 a 16 semicolcheias que ocupam posições aleatórias no tempo durante os três primeiros compassos criando ritmos distintos e inesperados.

Interactividade e Metaconcepção

Na música contemporânea existe um interesse crescente em trabalhos interactivos e multi-modulares (Campos, Traldi, Oliveira e Manzoli 2007). O poder dos computadores modernos e a sua capacidade de processamento oferecem novas possibilidades à composição musical, visual e multi-sensorial interactiva. A Arte do presente é a Arte em tempo real, a Arte ao vivo onde o que conta é a sua instantaneidade (Virilio 2005), o hiper-instrumento criado para esta demonstração é portanto actual pois calcula a composição audiovisual em tempo real. Enquanto hiper-instrumento, o objectivo central da sua meta-concepção foi a sua fácil e intuitiva utilização por seres humanos. A meta-concepção corresponde à concepção de utensílios, parâmetros e condições de funcionamento que permitem ao utilizador final tomar a responsabilidade da concepção última. Num contexto verdadeiramente interactivo, as vantagens da meta concepção são transferidas para o utilizador final. Os utilizadores/espectadores podem interagir com a composição, desenhando a sua linha melódica e controlando o número de batidas por minuto através de um interface que , não implica alfabetização. Dando aos utilizadores/espectadores o controlo da aplicação, estes tornam-se os performers do trabalho artístico. Segundo Kerckhove (1997) a primeira lei da interactividade estipula que o utilizador forma ou fornece o conteúdo. O facto de o espectador criar ou formar ele próprio o conteúdo, transforma-o enquanto receptor de comunicação em fornecedor principal.

Conclusão

O algoritmo implementado que permite a correspondência entre frequência sonora e frequência de cor luz, integrará certamente futuras composições multi-sensoriais uma vez que consideramos a sua reutilização e melhoramento. No que respeita à funcionalidade do projecto ao nível prático, não existe, por ora, uma amostragem representativa de resultados e de opiniões, uma vez que a proposta de correspondência e o hiper-instrumento que a demonstra ainda não foram apresentados publicamente.

O protótipo de hiper-instrumento que apresentamos, permite que pessoas com poucas ou nenhuma competência, enquanto utilizadoras e criadoras de audiovisual, participem num processo de composição algorítmica generativo. Merece portanto este trabalho uma continuação e análise mais aprofundadas, a desenvolver após implementação pública. Concluo que a correspondência entre frequência de cor luz e frequência sonora associada à concepção de sistemas interactivos multi-sensoriais, seja um terreno fértil para futuras investigações.

Agradecimentos

Dr. Álvaro Barbosa, pelo apoio à apresentação do hiper-instrumento; Arquitecta Anne-Kathrin Siegel, pela consultoria nas áreas de Música e Ergonomia; Dr. António Sousa Dias, pelo feedback e orientação; Matemáticos António Leite e Madalena Cardoso, consultoria matemática; Engenheiro Castro Freitas pela consultoria na área de Electrónica; Designers Fernando Alçada e Carla Megre pela experimentação do hiper-instrumento; Dr. Gustavo Martins, Dr. Carlos Caires e Dr^a Daniela Coimbra, pelos conceitos e conhecimentos expostos nas suas aulas; Compositor Jorge Antunes por disponibilizar pessoalmente os resultados dos seus estudos; Fotógrafo Jorge Rego, pela documentação fotográfica da apresentação; Artífice José Lima, pela execução do arco em ferro; Dr. Paulo Ferreira Lopes pela motivação e orientação; Simon Rangel como performer do hiper-instrumento; Engenheiro Stefan Grünsteidl pela consultoria na área de Optoelectrónica; todos os que influenciaram os resultados do meu trabalho.

Notas

[1] - Apesar de na física moderna, a luz ou a radiação electromagnética poderem ser descritas por uma de duas maneiras complementares: como onda num campo electromagnético ou como fluxo de partículas chamadas fótons. Apesar de ambas serem descrições aceitáveis da luz, a descrição da luz como onda é a que mais se adequa aos propósitos de estudo em questão.

Referências

- CAMPEN, Van (2007). *The Hidden Sense*, The MIT Press
- HERTZ, Paul (1999). *Synesthetic Art, an Imaginary Number?* Leonardo, Vol. 32, No. 05, The MIT Press, pp. 399-404

HIGGINS, Dick; HIGGINS, Hannah, (1966), *Synesthesia and Intersenses: Intermedia*, Something Else Newsletter 1, nº 1, 1966

COPE, David; In: MUSCUTT, Keith (2007). *Composing with Algorithms: An Interview with David Cope* Computer Music Journal Fall 2007, Vol. 31, No. 3, Pages 10-22

VEROSTKO, Roman (1999). *Algorithmic Art*, [Online]: <http://verostko.com/algorithm.html>

ALPERN, Adam (1995), *Techniques for Algorithmic Composition of Music*, Hampshire College Divisional Examination, Humanities and Arts.

BURNS, Krisitne (updated 1994), *Algorithmic Composition*, [Online]: <http://eamusic.dartmouth.edu/~wowem/hardware/algorithmdefinition.html>

LEVIN, Golan (2000), *Painterly Interfaces for Audiovisual Performance*. Massachusetts Institute of Technology.

COLLINS, Nick; d'ESCRIVAN, Julio (2007), *The Cambridge Companion to Electronic Music*. (Cambridge Companions in Music.) New York: Cambridge University Press, 2007. Page 127

SILVESTRINI, Narciso; FISCHER, Ernst (1999), *Colour order systems in art and science*, [Online]: <http://www.colorsystm.com/projekte/engl/18fiec.htm>

ANTUNES, Jorge (1982), *A correspondência entre os sons e as cores*. Brasília, Ed. Thesaurus, 1982. p. 29

MACHOVER, Tod (1992), *Hyperinstruments - A Progress Report*. MIT Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

HOFFMANN, Gernot (2000), *CIE Color Space* [Online]: www.fho-emden.de/~hoffmann/ciexyz29082000.pdf

BENNET, Roy (1982), *Form and Design*. Cambridge University Press.

LEACH, Jeremy and Fitch, John (1995), *Nature, Music, and Algorithmic Composition*. Computer Music Journal Summer 1995, Vol. 19, No. 2, Pages 23-33

CAMPOS, Cleber; TRALDI, Cesar; de OLIVEIRA, Luis Felipe; MANZOLLI, Jônatas; (2008),

Anticipation, Improvisation and Multimodality: Musical Meaning on Interactive Performance. Music Department, Arts Institute, University of Campinas [Online]: http://recherche.ircam.fr/equipes/analyse-synthese/EMUS/AGORA/abstract_poster/manzolli_poster_EMUS_AGORA_abstract.pdf

VIRILIO, Paul; Lotringer, Sylvère (2005), *The Accident of Art*. Semiotext(e) Ed.

KERCKHOVE, Derrick de (1997), *L'Intelligence des Réseaux*. Odile Jacob, Ed.

Anexo1

Tabela de correspondência cromofônica proposta por Jorge Antunes

MI	Mi	43	- 362.394.032.514.969,60	c/seg	- Infravermelho
FÁ	Fá	43	- 383.949.460.419.379,20	c/seg	- Infravermelho
FÁ#	Fá#	43	- 406.731.331.346.897,92	c/seg	- Vermelho
SOL	Sol	43	- 431.008.558.088.192,00	c/seg	- Vermelho
SOL#	Sol#	43	- 456.693.149.713.039,36	c/seg	- Vermelho
LÁ	Lá	43	- 483.785.116.221.440,00	c/seg	- Vermelho
LÁ#	Lá#	43	- 512.460.379.374.838,08	c/seg	- Laranja-avermelhado
SÍ	Si	43	- 543.070.783.191.121,92	c/seg	- Amarelo-esverdeado
DÓ	Dó	44	- 575.264.483.652.443,20	c/seg	- Verde
DÓ#	Dó#	44	- 609.393.324.558.570,24	c/seg	- Azul-cianótico
RÊ	Ré	44	- 645.633.227.830.107,20	c/seg	- Azul
RÊ#	Ré#	44	- 683.984.193.406.894,08	c/seg	- Azul-violeta
MÍ	Mi	44	- 724.798.065.029.939,20	c/seg	- Violeta-azul
FÁ	Fá	44	- 767.898.920.838.758,40	c/seg	- Violeta
FÁ#	Fá#	44	- 813.462.662.693.795,84	c/seg	- Ultravioleta
SOL	Sol	44	- 862.017.116.176.384,00	c/seg	- Ultravioleta

Anexo2

Tabela de conversão de Nm para CIE xyz

380,	2.689900e-003,	2.000000e-004,	1.226000e-002
385,	5.310500e-003,	3.955600e-004,	2.422200e-002
390,	1.078100e-002,	8.000000e-004,	4.925000e-002
395,	2.079200e-002,	1.545700e-003,	9.513500e-002
400,	3.798100e-002,	2.800000e-003,	1.740900e-001
405,	6.315700e-002,	4.656200e-003,	2.901300e-001
410,	9.994100e-002,	7.400000e-003,	4.605300e-001
415,	1.582400e-001,	1.177900e-002,	7.316600e-001
420,	2.294800e-001,	1.750000e-002,	1.065800e+000
425,	2.810800e-001,	2.267800e-002,	1.314600e+000
430,	3.109500e-001,	2.730000e-002,	1.467200e+000
435,	3.307200e-001,	3.258400e-002,	1.579600e+000
440,	3.333600e-001,	3.790000e-002,	1.616600e+000
445,	3.167200e-001,	4.239100e-002,	1.568200e+000
450,	2.888200e-001,	4.680000e-002,	1.471700e+000
455,	2.596900e-001,	5.212200e-002,	1.374000e+000
460,	2.327600e-001,	6.000000e-002,	1.291700e+000
465,	2.099900e-001,	7.294200e-002,	1.235600e+000
470,	1.747600e-001,	9.098000e-002,	1.113800e+000
475,	1.328700e-001,	1.128400e-001,	9.422000e-001
480,	9.194400e-002,	1.390200e-001,	7.559600e-001
485,	5.698500e-002,	1.698700e-001,	5.864000e-001
490,	3.173100e-002,	2.080200e-001,	4.466900e-001
495,	1.461300e-002,	2.580800e-001,	3.411600e-001
500,	4.849100e-003,	3.230000e-001,	2.643700e-001
505,	2.321500e-003,	4.054000e-001,	2.059400e-001
510,	9.289900e-003,	5.030000e-001,	1.544500e-001
515,	2.927800e-002,	6.081100e-001,	1.091800e-001

520, 6.379100e-002, 7.100000e-001, 7.658500e-002
 525, 1.108100e-001, 7.951000e-001, 5.622700e-002
 530, 1.669200e-001, 8.620000e-001, 4.136600e-002
 535, 2.276800e-001, 9.150500e-001, 2.935300e-002
 540, 2.926900e-001, 9.540000e-001, 2.004200e-002
 545, 3.622500e-001, 9.800400e-001, 1.331200e-002
 550, 4.363500e-001, 9.949500e-001, 8.782300e-003
 555, 5.151300e-001, 1.000100e+000, 5.857300e-003
 560, 5.974800e-001, 9.950000e-001, 4.049300e-003
 565, 6.812100e-001, 9.787500e-001, 2.921700e-003
 570, 7.642500e-001, 9.520000e-001, 2.277100e-003
 575, 8.439400e-001, 9.155800e-001, 1.970600e-003
 580, 9.163500e-001, 8.700000e-001, 1.806600e-003
 585, 9.770300e-001, 8.162300e-001, 1.544900e-003
 590, 1.023000e+000, 7.570000e-001, 1.234800e-003
 595, 1.051300e+000, 6.948300e-001, 1.117700e-003
 600, 1.055000e+000, 6.310000e-001, 9.056400e-004
 605, 1.036200e+000, 5.665400e-001, 6.946700e-004
 610, 9.923900e-001, 5.030000e-001, 4.288500e-004
 615, 9.286100e-001, 4.417200e-001, 3.181700e-004
 620, 8.434600e-001, 3.810000e-001, 2.559800e-004
 625, 7.398300e-001, 3.205200e-001, 1.567900e-004
 630, 6.328900e-001, 2.650000e-001, 9.769400e-005
 635, 5.335100e-001, 2.170200e-001, 6.894400e-005
 640, 4.406200e-001, 1.750000e-001, 5.116500e-005
 645, 3.545300e-001, 1.381200e-001, 3.601600e-005
 650, 2.786200e-001, 1.070000e-001, 2.423800e-005
 655, 2.148500e-001, 8.165200e-002, 1.691500e-005
 660, 1.616100e-001, 6.100000e-002, 1.190600e-005
 665, 1.182000e-001, 4.432700e-002, 8.148900e-006
 670, 8.575300e-002, 3.200000e-002, 5.600600e-006
 675, 6.307700e-002, 2.345400e-002, 3.954400e-006
 680, 4.583400e-002, 1.700000e-002, 2.791200e-006
 685, 3.205700e-002, 1.187200e-002, 1.917600e-006
 690, 2.218700e-002, 8.210000e-003, 1.313500e-006
 695, 1.561200e-002, 5.772300e-003, 9.151900e-007
 700, 1.109800e-002, 4.102000e-003, 6.476700e-007
 705, 7.923300e-003, 2.929100e-003, 4.635200e-007
 710, 5.653100e-003, 2.091000e-003, 3.330400e-007
 715, 4.003900e-003, 1.482200e-003, 2.382300e-007
 720, 2.825300e-003, 1.047000e-003, 1.702600e-007
 725, 1.994700e-003, 7.401500e-004, 1.220700e-007
 730, 1.399400e-003, 5.200000e-004, 8.710700e-008
 735, 9.698000e-004, 3.609300e-004, 6.145500e-008
 740, 6.684700e-004, 2.492000e-004, 4.316200e-008
 745, 4.614100e-004, 1.723100e-004, 3.037900e-008
 750, 3.207300e-004, 1.200000e-004, 2.155400e-008
 755, 2.257300e-004, 8.462000e-005, 1.549300e-008
 760, 1.597300e-004, 6.000000e-005, 1.120400e-008
 765, 1.127500e-004, 4.244600e-005, 8.087300e-009
 770, 7.951300e-005, 3.000000e-005, 5.834000e-009
 775, 5.608700e-005, 2.121000e-005, 4.211000e-009
 780, 3.954100e-005, 1.498900e-005, 3.038300e-009
 785, 2.785200e-005, 1.058400e-005, 2.190700e-009
 790, 1.959700e-005, 7.465600e-006, 1.577800e-009
 795, 1.377000e-005, 5.259200e-006, 1.134800e-009
 800, 9.670000e-006, 3.702800e-006, 8.156500e-010
 805, 6.791800e-006, 2.607600e-006, 5.862600e-010
 810, 4.770600e-006, 1.836500e-006, 4.213800e-010
 815, 3.355000e-006, 1.295000e-006, 3.031900e-010
 820, 2.353400e-006, 9.109200e-007, 2.175300e-010
 825, 1.637700e-006, 6.356400e-007, 1.547600e-010

<http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/database/data/cmfs/ciexyzjv.txt>

Anexo 3

Conversão xyz para rgb:

```
var_R = var_X * 3.2406 + var_Y * -1.5372 +
var_Z * -0.4986
var_G = var_X * -0.9689 + var_Y * 1.8758 +
var_Z * 0.0415
var_B = var_X * 0.0557 + var_Y * -0.2040 +
var_Z * 1.0570
```

```
if ( var_R > 0.0031308 ) var_R = 1.055 * ( var_R ^
( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_R = 12.92 * var_R
if ( var_G > 0.0031308 ) var_G = 1.055 * ( var_G
^ ( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_G = 12.92 * var_G
if ( var_B > 0.0031308 ) var_B = 1.055 * ( var_B ^
( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_B = 12.92 * var_B
```

```
R = var_R * 255
G = var_G * 255
B = var_B * 255
```

[http://www.easycrgb.com/index.php?](http://www.easycrgb.com/index.php?X=MATH&H=01#text1)
 X=MATH&H=01#text1

Anexo 4

Modelo matemático que desenvolvemos para converter a frequência fundamental das notas da tessitura de um piano para comprimentos de onda de cores do espectro visível:

$$n = 700 - (12 * (\log(f/220)/\log(2)) + 36) * 3.44827586207$$

O modelo anterior, foi adaptado a partir do modelo seguinte.

$$n = 12 * (\log(f/220)/\log(2)) + 57$$

Fonte:
<http://www.music.mcgill.ca/~gary/306/week11/mspfeatures.html>