

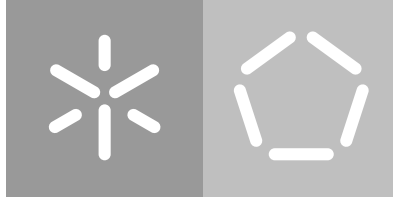
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Pedro M. Silva

Musikla

Music and Keyboard Language



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Pedro M. Silva

Musikla

Music and Keyboard Language

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Informática

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

José João Almeida

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositoriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.en>

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Lorem ipsum.

Agradecimentos

Quando estamos perante um momento importante da nossa vida, é fácil pensarmos nele como um momento circunspecto e isolado. Uma fase que acaba e outra que começa. Um antes e um depois. Mas a minha experiência até agora mostrou-me que na verdade, a minha vida tem sido mais um contínuo. E nesse contínuo estão um conjunto de pessoas sem o qual seria impossível pensar sonhar em fazer o que fiz.

Por isso mesmo, em primeiro lugar, gostava de agradecer profundamente ao meu orientador de dissertação, o Professor José João Almeida, pela ajuda durante todo este processo. Sempre pronto a transmitir experiência e conhecimento, novas ideias, críticas construtivas e positivas, incentivando-me a agarrar todas as oportunidades, mas mais importante que tudo, encorajando-me sempre a seguir ao meu próprio ritmo e tomar o meu próprio caminho.

Gostava também de agradecer aos meus colegas de curso, em especial à Sofia Silva, sempre pronta a ajudar para qualquer dúvida que eu tivesse e para me dar motivação para seguir em frente.

Também não me posso esquecer de agradecer a todos os professores que tive, em particular aos professores Carlos Carvalho, Luís Cerejeira, Daniel Rego e Pedro Ribeiro, que me ensinaram, inspiraram, e se esforçaram para me providenciarem oportunidades e experiências que nunca irei esquecer, e que me abriram portas na vida que de outra forma me estariam fechadas.

E mais importante que tudo, gostava de agradecer à minha família. À minha mãe, que sempre me apoiou durante todo o curso e fez o que fosse preciso para tornar a minha experiência o melhor possível. À minha tia, uma das pessoas mais trabalhadoras que conheço, que não pensa duas vezes antes de me ajudar em tudo o que eu precisar, e que está sempre presente para me apoiar. E finalmente ao meu irmão, a quem eu sempre quis seguir os passos, e que me fez querer começar a programar desde os doze anos de idade. Se não fosse por ele, não estaria a fazer esta dissertação, nem a acabar este curso, nem teria tido as oportunidades que tive.

A todos, estou eternamente grato. Muito obrigado.

Resumo

Título: Musikla - Linguagem para Música e Teclados

A criação de música usando sintetizadores é uma prática que conta já com várias décadas de uso. Com a proliferação dos computadores pessoais, popularizaram-se também os sintetizadores digitais e as Digital Audio Workstations.

Este projeto tem como objetivo utilizar as tecnologias de produção e manipulação de áudio digital, e envolvê-las numa linguagem de domínio específico que permita facilmente descrever composições musicais, gerar sons dinamicamente, estudar propriedades da própria teoria musical, ou até criar teclados virtuais que toquem sons ou executem ações e podem ser utilizados para realizar espetáculos multimédia ao vivo.

Palavras-chave: Interpretador, Linguagem de Domínio Específico, Notação Musical, Processamento de Linguagens...

Abstract

Title: Musikla - Music and Keyboard Language

The creation of music using synthesizers is a practice that boasts many decades of existence. With the proliferation of personal computers, digital synthesizers and Digital Audio Workstations rose in popularity as well.

This project aims to use the digital audio production and manipulation technologies, and wrap them in a domain specific language that allows to easily describe music compositions, generate sounds dynamically, study properties of music theory or even create virtual keyboards that play sounds or execute actions and can be used to perform live multimedia shows.

Keywords: Domain Specific Language, Interpreter, Language Processing, Music Notation ...

Índice

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Listagens	xii
Glossário	xiv
Siglas	xv
Publicações	xvi
1. Musikla: Language for Generating Musical Events	xvi
1 Introdução	1
2 Estado da Arte	2
2.1 Trabalho Relacionado	2
2.1.1 Alda	2
2.1.2 ABC Notation	3
2.1.3 Faust	4
2.1.4 SuperCollider	6
2.1.5 ChuckK	7
2.1.6 Sonic Pi	10
2.2 Gramáticas	11
2.2.1 Diferenças: CFG vs PEG	11
2.2.2 Resumo	12
2.3 SoundFonts	13
2.4 Sintetizadores	14
2.4.1 Inicialização	14
2.4.2 Utilização	15
3 O problema e os seus desafios	16
3.1 Objetivos	16

3.2	Solução Proposta	17
3.2.1	Gramática da Linguagem	19
3.2.2	Arquitetura do Sistema	22
3.2.3	Álgebra Musical	24
4	Casos de Estudo	26
4.1	Tocar Música	26
4.2	Simples Fuga	27
4.3	Definir um teclado	28
4.4	Teclado de <i>Arpeggios</i>	29
4.5	Teclado Geral com MIDI	30
4.6	QWERTY Keyboard	31
4.7	Conclusão	33
5	Desenvolvimento	34
5.1	Linguagem	34
5.1.1	Sintaxe	35
5.1.2	Gramática	38
5.1.3	Parser	43
5.2	Interpretador	44
5.2.1	Contexto	45
5.2.2	Scope de Símbolos	46
5.2.3	Módulos	47
5.2.4	Operadores Musicais	48
5.3	Biblioteca Standard	53
5.3.1	Inputs & Outputs	53
5.3.2	Ficheiros de Som	58
5.3.3	Grelhas	59
5.3.4	Teclados Musicais	61
5.3.5	Editor Embutido	69
5.3.6	Transformadores	71
6	Manual de Utilização	74
6.1	Módulos	74
6.2	Configuração	75
6.3	Linha de Comandos	76
7	Conclusão	77
	Bibliografia	79

Apêndices	81
.1 Apendíce 1: Gramática	81

Lista de Figuras

3.1	Arquitectura Geral do Projeto	23
3.2	Arquitectura do Interpretador	24
4.1	Generated music sheet for fugue example, audio version available here ¹	27
5.1	Pauta musical gerada pela linguagem ² , versão áudio disponível aqui ³	49
5.2	Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível aqui ⁴	49
5.3	Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível aqui ⁵	50
5.4	Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível aqui ⁶	51
5.5	Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível aqui ⁷	51
5.6	Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível aqui ⁸	52
5.7	Representação de duas células de uma grelha	59
5.8	As várias áreas configuráveis de uma grelha	60
5.9	Áreas em que a grelha irá mover os eventos, e qual o separador a que pertencem.	61
5.10	Posição dos eventos após o alinhamento com a grelha ter sido aplicado.	61
5.11	Janela de carregamento dos buffers	68
5.12	Interface do editor embutido.	70
5.13	Implementação básica de uma solução de <i>auto-complete</i>	70

Lista de Tabelas

5.1	Lista de abreviaturas possíveis de serem acrescentadas a seguir a uma nota para especificar um acorde.	36
5.2	Lista de modificadores e exemplos da sua utilização	37
5.3	Formato nativo suportado pelo FluidSynth	58

Listagens

2.1	Exemplo da linguagem alda	3
2.2	Exemplo da notação ABC	4
2.3	Exemplo da notação ABC	4
2.4	Geração de ruído aleatório com volume a metade	5
2.5	Geração de ruído aleatório com um filtro <i>low-pass</i>	5
2.6	Geração de ruído aleatório com um filtro <i>low-pass</i> controlada por uma interface	5
2.7	Declaração de dois canais de áudio com base em dois osciladores	6
2.8	Dividir um gerador por dois canais de forma desigual	6
2.9	Dividir um gerador por dois canais de forma desigual	7
2.10	Reproduzir um oscilador durante dois segundos	8
2.11	Reproduzir um oscilador infinitamente	8
2.12	Reproduzir um oscilador, variando a frequência a cada 2 segundos	8
2.13	Exemplos de instruções de avanço no tempo	9
2.14	Exemplos de instruções de avanço no tempo	9
2.15	Reproduzir um <i>sample</i> com valores aleatórios	10
2.16	Reproduzir um notas de uma escala aleatórias, com efeito <i>reverb</i>	11
2.17	Gramática	12
2.18	Sistema de Tipos de um ficheiro SoundFont	14
3.1	Exemplo da sintaxe proposta da linguagem	19
3.2	Exemplos de notas	20
3.3	Exemplo da sintaxe de teclados virtuais	21
3.4	Exemplo da sintaxe proposta da linguagem	22
4.1	Exemplo da sintaxe para criação de música	26
4.2	Exemplo da declaração da estrutura e conteúdo de uma simples fuga de duas vozes	27
4.3	Exemplo da sintaxe para criação de teclados	28
4.4	Definição de um teclado de acordes	29
4.5	Exemplo da sintaxe proposta da linguagem	31
4.6	Exemplo da sintaxe proposta da linguagem	31
5.1	Expressão Regular que identifica uma nota (quebras de linha adicionadas apenas para claridade de leitura)	35

5.2	Exemplos de três definições de acordes possíveis	36
5.3	Produções base da gramática	38
5.4	Produções base da gramática	38
5.5	Produções de instruções na gramática	39
5.6	Produções de expressões na gramática	40
5.7	Produções de expressões na gramática	41
5.8	Produções de declaração de teclados na gramática	42
5.9	Excerto da gramática desenvolvida	43
5.10	Métodos responsáveis por criarem a AST	43
5.11	Excerto da música <i>Wet Hands</i> de C418	48
5.12	Excerto do começo do tema principal de <i>Westworld</i> , por Ramin Djawadi	49
5.13	Excerto da música <i>Soft to Be Strong</i> de Marina	50
5.14	Exemplo de transposição de um acompanhamento com três notas	50
5.15	Três acordes diferentes arpegiados com o mesmo padrão	51
5.16	Redimensionamento da duração de uma expressão musical	52
5.17	Exemplo de reproduzir um ficheiro a seguir a duas notas	58
5.18	Verificar se um ficheiro de audio está otimizado, e convertê-lo caso contrário	58
5.19	Código de definição da grelha representada na figura 5.8	60
5.20	Código alternativo de definição da grelha representada na figura 5.8, com as propriedades <i>left</i> e <i>right</i>	60
5.21	Exemplo de declaração de duas teclas	62
5.22	Declaração de três eventos, o primeiro é uma combinação de teclas, o segundo referência o <i>virtual key code</i> , e o terceiro uma nota MIDI	62
5.23	Teclado que imprime as coordenadas do rato sempre que ele se move	63
5.24	Aplicar o modificar <i>hold extend</i> a um teclado inteiro	64
5.25	Código gerado automaticamente para criação do teclado descrito no capítulo anterior	65
5.26	Declaração de teclado dinâmica recorrendo ao uso de ciclos, condicionais e blocos de código.	65
5.27	Gravação de uma <i>performance</i>	66
5.28	Reprodução de uma <i>performance</i>	66
5.29	Conversão de uma <i>performance</i> numa sequência de eventos musicais	67
5.30	Instanciação de um <i>buffer</i>	67
5.31	Funções disponibilizadas para criação de <i>buffers</i> controlados por teclados.	68
5.32	Formato do ficheiro de gravação dos <i>buffers</i>	69
5.33	Abre o editor quando a tecla <code>\</code> é premida	69
5.34	Abrir manualmente o editor	70
5.35	Exemplo de uma função <i>map</i> com versões síncronas e assíncronas	71
5.36	Implementação da função <i>map</i> usando a nossa abordagem de transformadores	73

5.37	Exemplo de um transformador map e da sua utilização	73
6.1	Processo de instalação do <i>package</i> musikla	74
6.2	Exemplo de um ficheiro de configuração da linguagem	75
6.3	Exemplo de um ficheiro de configuração da linguagem	76
../..	code/musikla/musikla/parser/grammar.peg	81

Glossário

acidental	Corresponde à nota de uma frequência que não pertence à escala musical atual. Representam-se pelos símbolos sustenido \sharp (<i>sharp</i> em inglês), bemol \flat (<i>flat</i>) ou bequadro \natural (<i>natural</i>), e que geralmente aumentam ou diminuem a frequência da nota por um semitom.
acorde	Conjunto de várias notas que são geralmente tocadas em simultâneo.
arpeggio	Passa pela reprodução sequencial das notas de um acorde (em vez de as tocar em simultâneo). Pode ser simples (tocar cada nota uma vez em sequência) ou seguir uma melodia mais complexa usando as notas disponíveis.
escala diatônica	Uma escala musical composta por sete notas, como um intervalo de 12 semitons entre as suas notas. Este padrão de notas repete-se a cada oitava nota, subindo ou descendo a sua frequência.
ligaduras	Símbolo colocado nas partituras musicais para ligar notas seguidas com o mesmo <i>pitch</i> em diferentes compassos. As durações das notas são somadas e elas são tocadas como uma só nota.
oitava	Intervalo entre uma nota musical, e a correspondente com dobro ou metade da sua frequência. Na escala diatônica, uma oitava corresponde a 12 semitons.
semitom	Também chamado de meio-tom, é o menor intervalo utilizado na escala diatônica. Representa a distância tónica entre duas teclas adjacentes de um piano.
sintetizador	Dispositivo ou <i>software</i> responsável por gerar sinais de áudio em tempo real.

Siglas

AOT	Ahead Of Time
API	Aplication Public Interface
AST	Abstract Syntax Tree
CFG	Context Free Grammar
DAW	Digital Audio Workstation
DSL	Domain Specific Language
HTML	HyperText Markup Language
I/O	Input/Output
IDE	Integrated Development Environment
JIT	Just In Time
MIDI	Music Instrument Digital Interface
PEG	Parsing Expression Grammar
SVG	Scalable Vector Graphics
WAV	Waveform Audio File Format

1. Musikla: Language for Generating Musical Events

Autores: Pedro M. Silva e José João Almeida

Livro/Editora:

Ano: 2020

Abstract: In this paper, we'll discuss a simple approach to integrating musical events, such as notes or chords, into a programming language. This means treating music sequences as a first class citizen. It will be possible to save those sequences into variables or play them right away, pass them into functions or apply operators on them (like transposing or repeating the sequence). Furthermore, instead of just allowing static sequences to be generated, we'll integrate a music keyboard system that easily allows the user to bind keys (or other kinds of events) to expressions. Finally, it is important to provide the user with multiple and extensible ways of outputting their music, such as synthesizing it into a file or directly into the speakers, or writing a MIDI or music sheet file. We'll structure this paper first with an analysis of the problem and its particular requirements. Then we will discuss the solution we developed to meet those requirements. Finally we'll analyze the result and discuss possible alternative routes we could've taken.

Keywords Domain Specific Language, Music Notation, Interpreter, Programming Language

Estado Publicado

Introdução

O objetivo deste trabalho é estudar e prototipar formas de criação de música com recurso a técnicas habitualmente usadas na criação de *software*. Para além de permitir criar música através das notas introduzidas manualmente, a linguagem deve facilitar a geração de música de um modo mais dinâmico, com recurso a operações de combinação e transformação de notas, como concatenar e misturar música.

O termo música neste contexto é usado num sentido mais amplo que apenas sons. O objetivo desta linguagem é permitir gerar vários *outputs* através do mesmo código fonte, como pautas musicais, ABC, WAV, MIDI, entre outros.

Uma das partes mais críticas relativas à pesquisa e desenvolvimento necessários para a realização desta linguagem é a componente temporal implícita em todos os aspetos da linguagem: deve ser possível de um modo intuitivo expressar as várias composições possíveis de notas sem ser necessário expressar os tempos manualmente, tais como notas sequenciais, notas em paralelo, acordes, pequenas pausas e grandes pausas, bem como sincronizar partes da música de modo simples.

Estado da Arte

Atualmente a produção de música é realizada utilizando programas com interfaces gráficas, geralmente denominados como [Digital Audio Workstation \(DAW\)](#). A minha abordagem irá consistir em estudar formas de criar e tocar músicas ao vivo (e não só) através de uma [Domain Specific Language \(DSL\)](#), usando técnicas inspiradas nas linguagens de programação e no desenvolvimento de *software*.

2.1 Trabalho Relacionado

Existem diversos tipos de linguagens usadas atualmente para produzir ou simplesmente descrever música. Algumas fazem uso do conceito de notas musicais, com recurso a algum sintetizador externo, para gerar os sons, enquanto outras funcionam com base na manipulação direta de ondas de som digitais para criar música. Algumas suportam apenas a descrição estática da música, enquanto outras permitem formas dinâmicas tais como funções, variáveis, estruturas de controlo e repetição, ou até mesmo algoritmos aleatórios que permitem gerar músicas diferentes a cada execução.

Iremos de seguida analisar algumas das soluções disponíveis atualmente, bem como comparar as funcionalidades que cada uma oferece ou não oferece em relação aos objetivos deste projeto.

2.1.1 Alda

O projeto **alda** [5] é uma linguagem de música textual desenvolvida em *JAVA* focada na simplicidade: o seu maior ponto de atração é apelar tanto a programadores com pouca experiência musical, bem como a músicos com pouca experiência com programação. Apesar de ser anunciada como direcionada tanto a músicos como a programadores, a linguagem não suporta nenhum tipo de construções dinâmicas, como ciclos ou funções. Este tipo de funcionalidades, se necessário, requer o uso de uma linguagem de

programação por cima, que poderia por exemplo, gerar o código *alda* em *runtime* através da manipulação de *strings* antes de o executar. Isto significa que não é possível implementar composições interativas.

2.1.1.1 Exemplos

O exemplo seguinte demonstra um simples programa escrito em *alda*, demonstrando: a seleção de um instrumento (*piano:*), a definição da oitava base (*o3*), um acorde com quatro notas (*c1/e/g/>c4*) em que a última se encontra uma oitava acima das outras.

```
1 piano: o3 c1/e/g/>c4 < b a g | < g+1/b/>e
```

Listagem 2.1: Exemplo da linguagem *alda*

É também possível verificar o uso de acidentes (identificados pelos símbolos + ou - a seguir a uma nota) bem como a diferenciação da duração de algumas notas (identificadas pelos números em frente às notas).

2.1.2 ABC Notation

A notação **ABC** [14] [2] é uma notação textual que permite descrever notação musical. É bastante completa, tendo formas de descrever notas, acordes, acidentes, uniões de notas, *lyrics*, múltiplas vozes, entre outros.

Para além da exaustividade de sintaxe que permite descrever quase todo o tipo de música, a popularidade da linguagem também significa que existem já inúmeros conversores de ficheiros ABC para os mais diversos formatos, desde ficheiros MIDI, pautas musicais, ou mesmo ficheiros WAV (gerados através do fornecimento de um ficheiro SoundFont, por exemplo).

A complexidade da notação traz tanto vantagens como desvantagens, no entanto: A sua ubiquidade significa que uma maior percentagem de utilizadores já se pode sentir à vontade com a sintaxe, o que não acontece com outras linguagens menos conhecidas. Mas por outro lado, conhecer ou implementar toda a especificação [4] é um feito bastante difícil.

No entanto, tal como a linguagem *ALDA*, as músicas definidas são estáticas, pelo que não serve como uma linguagem de programação de músicas dinâmicas. Ainda assim, apesar de implementar toda a notação ser algo pouco prático, implementar um *subset* da notação, contendo as construções mais usadas seria uma vantagem enorme que me permitiria aproveitar a familiaridade de muitos utilizadores com as partes mais comuns da sintaxe.

2.1.2.1 Exemplos

A sintaxe de um ficheiro *ABC* é composta por duas partes: um cabeçalho onde são definidas as configurações da música atual, seguido pelo corpo da música. O cabeçalho é formado por várias linhas. Cada linha, em ABC chamada de campo, tem uma chave e um valor separados por dois pontos (:). A

especificação da notação descreve bastantes campos possíveis, mas os mais usados são: **X** (número de referência), **T** (título), **M** (compasso), **L** (unidade de duração de nota) e **K** (clave).

```
1 C, D, E, F, | G, A, B, C | D E F G | A B c d | e f g a | b c' d' e' | f' g' a' b' | ]
```

Listagem 2.2: Exemplo da notação ABC

No exemplo acima podemos ver uma escala completa das notas (sem acidentes). O chamado C médio é representado por um **c** minúsculo (a capitalização das letras muda o significado). Para subir uma oitava, podemos anotar as notas com um apóstrofo (**c'**). As oitavas subsequentes são anotadas por mais apóstrofes. De modo análogo, para baixar uma oitava, devemos usar primeiro a nota em maiúscula (**C**). As oitavas anteriores são identificadas por uma (ou mais) vírgula a seguir à nota com letra maiúscula (**C,**).

```
1 A/2 A/ A A2 __A _A =A ^A ^^A [CEGc] [C2G2] [CE][DF]
```

Listagem 2.3: Exemplo da notação ABC

A duração das notas pode ser ajustada relativamente à unidade global definida no cabeçalho acrescentando um número (por exemplo **2**) ou fração **1/4** à nota. Os acidentes bemol, bequadro e sustenido podem ser adicionados acrescentando um **_**, **=** e **^** antes da nota, respetivamente. Acordes (notas tocadas ao mesmo tempo) podem ser definidas entre parênteses retos (**[e]**).

A notação disponibiliza muitos mais exemplos de todas as funcionalidades aceites no seu website [3].

2.1.3 Faust

A linguagem **Faust** [orlarey:hal-02158894, 7, 17] é uma linguagem de programação funcional com foco na sintetização de som e processamento de áudio. Ao contrário das linguagens analisadas até agora, não trabalha com abstrações de notas e elementos musicais. Em vez disso, a linguagem trabalha diretamente com ondas sonoras (representadas como *streams* de números) e através de expressões matemáticas, que de uma forma funcional permitem assim manipular o som produzido.

Um dos pontos fortes da linguagem é o facto da sua arquitetura ser construída de raiz para compilar o mesmo código fonte em várias linguagens. De facto, o projeto conta com várias dezenas de *targets*, desde os mais óbvios (C, C++, Java, JavaScript) até alguns mais especializados (WebAssembly, LLVM Bitcode, instrumentos VST/VSTi). Também permite gerar aplicações *standalone* para as bibliotecas de áudio mais comuns já embutidas [11].

A linguagem vem embutida com uma biblioteca extremamente completa [9] que implementa, entre muitas outras, funções de matemática comuns, filtros áudio e funcionalidades extremamente básicas de interfaces gráficas que permitem controlar em tempo real os valores do programa (como botões e *sliders*, entre outros).

2.1.3.1 Exemplos

A documentação do projeto conta com uma quantidade abundante de exemplos [8] e com um tutorial para iniciantes [10], do qual irei colocar aqui alguns pequenos pedaços de código que demonstram as capacidades fundamentais da linguagem.

```
1 import("stdfaust.lib");
2 process = no.noise*0.5;
```

Listagem 2.4: Geração de ruído aleatório com volume a metade

No primeiro exemplo, podemos ver a estrutura mais básica de um programa escrito em *Faust*. Na primeira linha é importada a biblioteca *standard* da linguagem. Na segunda linha podemos ver a *keyword* **process**, que representa o *input* e *output* audio do nosso programa. Finalmente, em frente a essa *keyword* podemos ver a expressão `no.noise*0.5`. Isto demonstra a utilização de construções da biblioteca *standard*, como o gerador de ruído aleatório, bem como a utilização de operadores matemáticos usuais (neste caso a multiplicação) para manipular o audio, e diminuir o volume para metade.

```
1 import("stdfaust.lib");
2 ctFreq = 500;
3 q = 5;
4 gain = 1;
5 process = no.noise : fi.resonlp(ctFreq,q,gain);
```

Listagem 2.5: Geração de ruído aleatório com um filtro *low-pass*

Neste exemplo, estamos a usar o operador `:` para canalizar o output do gerador de ruído para um filtro *low-pass*, que filtra todas as frequências acima de um valor de corte (a variável `ctFreq`). Aumentar esta variável resulta num som mais agudo, enquanto que ao diminui-la obtemos um som mais grave (pois o valor de corte é mais baixo, apenas os sons abaixo desse valor são passados).

```
1 import("stdfaust.lib");
2 ctFreq = hslider("[0]cutoffFrequency",500,50,10000,0.01);
3 q = hslider("[1]q",5,1,30,0.1);
4 gain = hslider("[2]gain",1,0,1,0.01);
5 t = button("[3]gate");
6 process = no.noise : fi.resonlp(ctFreq,q,gain)*t;
```

Listagem 2.6: Geração de ruído aleatório com um filtro *low-pass* controlada por uma interface

Por fim podemos ver um exemplo igual ao anterior, mas em vez de ter os valores das variáveis estáticos (guardados nas variáveis `ctFreq`, `q` e `gain`), estes são controlados em tempo real pela interface definida pelas chamadas à função `hslider`. Foi também adicionada uma variável `t` com um botão *"gate"*. Este produz o valor 0 (zero) quando está solto, e o valor 1 (um) quando está pressionado, valor que quando multiplicado pelo resto da expressão serve efetivamente como um *on/off switch* para todo o sistema.

2.1.4 SuperCollider

O projeto **SuperCollider** [orlarey:hal-02158894, 16] é uma plataforma para geração e sintetização de som e música. É composta em parte pela linguagem interpretada **sclang**, focada na componente de áudio, mas com funcionalidades de programação generalizada. Também tem um servidor de áudio *realtime* **scsynth**, que pode ser controlado pela linguagem *sclang*, e que implementa diversas técnicas de geração de áudio otimizadas (permitindo ao utilizador programar também as suas próprias técnicas customizadas através de C++). Também integra um IDE **scide** que disponibiliza um ambiente de edição integrado para todo o ecossistema, bem como ferramentas de ajuda e introdução à plataforma.

É uma linguagem de baixo nível em termos musicais, mas com um grande ecossistema para integrar os mais diversos componentes, desde controladores MIDI a interfaces gráficas. Mas a nível musical, como já referido, foca-se na sintetização e manipulação de ondas de som, sem ter noção de conceitos mais abstratos como notas ou acordes. Tais noções têm de ser manualmente implementadas pelo utilizador, e de uma forma bastante mais verbosa do que o desejável.

2.1.4.1 Exemplos

A linguagem do projeto *sclang* é uma linguagem orientada a objetos mas com aspetos funcionais (como *currying* ou listas em compreensão).

```
1 { [SinOsc.ar(440, 0, 0.2), SinOsc.ar(442, 0, 0.2)] }.play;
```

Listagem 2.7: Declaração de dois canais de áudio com base em dois osciladores

No exemplo presente na listagem 2.7, é declarada uma função (demarcada pelo par de chavetas) que retorna uma lista com dois osciladores de ondas sinusoidais. O som dos osciladores é depois reproduzido através da chamada da função `play`. De notar que como os osciladores estão dentro de um *array*, isso significa que estamos a gerar múltiplos canais de áudio (dois neste caso), com um oscilador para cada canal.

O oscilador `SinOsc` é apenas um dos geradores de som disponibilizados pelo servidor *scsynth*, também chamados **UGens**. Existem outros, e mais importante, é possível compor esses geradores para criar sons mais complexos.

Um exemplo ainda relativamente simples desse tipo de composição, presente na listagem 2.8 seria usar o gerador *Pan2* que redireciona o som oriundo de outro gerador para dois canais diferentes. A prevalência do som em cada canal (o *pan*) pode ser customizada por um segundo argumento, com um valor entre -1 e 1, onde -1 emitiria apenas som no canal da esquerda, 1 emitiria apenas som no canal da direita, e qualquer valor pelo meio iria produzir uma gradação entre os dois canais, linearmente proporcional a esse valor.

```
1 { Pan2.ar(PinkNoise.ar(0.2), -0.3) }.play;
```

Listagem 2.8: Dividir um gerador por dois canais de forma desigual

É possível criar uma versão mais interessante deste exemplo quando sabemos que os geradores podem ser utilizados não só para gerar som, mas também para servirem de parâmetros a outros geradores. Por exemplo, na listagem 2.9, em vez de passarmos um número literal -0.3 como segundo argumento, podemos passar um oscilador. Desta forma, o som gerado pelo `PinkNoise` irá variar em proporção ao longo do tempo pelos dois canais gerados, em vez de tocar de forma fixa no mesmo.

```
1 { Pan2.ar(PinkNoise.ar(0.2), SinOsc.kr(0.5)) }.play;
```

Listagem 2.9: Dividir um gerador por dois canais de forma desigual

A linguagem é bastante mais complexa, podendo declarar variáveis, objetos, executar funções, estruturas de controlo como condicionais e ciclos, e muito mais. Relativamente à parte musical, contém ferramentas bastante poderosas, mas apenas de baixo nível, com manipulação da música focada em ondas sonoras.

2.1.5 Chuck

A linguagem **Chuck** [22] [[wang2003chuck](#)] é outra linguagem de sintetização de áudio digital, similar aos projetos *SuperCollider* e *Faust*. O seu maior fator de diferenciação advém da sua abordagem única e interessante de sincronização de processos concorrentes baseado em unidades de tempo (que os autores do projeto denominaram **strongly-timed**).

Este conceito significa que o utilizador pode definir tempos virtuais associados a quando certas instruções devem ocorrer. Tal garantia torna-se útil quando combinada com o conceito de *shreds* (processos virtuais que podem estar a correr concorrentemente) e que dão a aparência para o utilizador que estão na verdade a correr em paralelo. A máquina virtual por trás da linguagem, responsável por traduzir as instruções em áudio, assegura-se que os *shreds* são **sample-synchronous**, ou seja, cada *sample* (ou amostra) geradas pelos *shreds* e com o mesmo *timestamp* virtual irão ser sempre reproduzidas ao mesmo tempo (mesmo que o processador tenha demorado mais tempo a correr um dos *shreds* do que os outros). Isto é, apesar de as *samples* podem-se atrasar, mas a máquina garante que tal acontece de forma sincronizada, sem a possibilidade de criar desfazamento entre os vários *shreds*.

Mais uma vez esta linguagem lida com o conceito de geração de áudio a um baixo nível, e não é portanto muito adequada para a descrição de notação musical. Apesar disso, este projeto apresenta também um fator diferenciador que permite utilizar a sua componente de agendamento temporal de eventos, para permitir interatividade (através de eventos *MIDI* ou do teclado do computador). Mais uma vez, mesmo estas funcionalidades são de baixo nível (como iremos abordar mais em detalhe nos exemplos) mas é agradável saber que já vêm pelo menos incluídas com a linguagem.

2.1.5.1 Exemplos

A operação central da linguagem *Chuck* passa pelo operador `=>` (também chamado de operador *chucking*). A sua semântica pode ser pensada um pouco como a atribuição a variáveis, ou *piping* de dados.

Por exemplo, na listagem 2.10 podemos ver a declaração de um oscilador sinusoidal **SinOsc s** que é *chucked* para a variável **dac**. Esta é uma variável especial da linguagem e que representa o dispositivo de reprodução de áudio (as colunas ou auscultadores).

Na linha seguinte podemos ver também que é atribuída à variável **now** o valor de dois segundos: esta é outra variável especial da linguagem, neste caso responsável por controlar o agendamento da execução de código. Ao executar essa instrução, estamos efetivamente a parar a execução da *shred* atual durante dois segundos (ficando o som do oscilador definido na linha atrás a enviar som durante os dois segundos para o dispositivo de áudio reproduzir).

```
1 SinOsc s => dac;
2
3 2::second => now;
```

Listagem 2.10: Reproduzir um oscilador durante dois segundos

Ao fim dos dois segundos, como o programa não tem mais nenhuma instrução, a reprodução de som termina. Se quiséssemos reproduzir som infinitamente, poderíamos mover a instrução de avançar no tempo para dentro de um ciclo, como vemos na listagem 2.11 (criando o que é chamado de *time-loop*, ou neste caso em particular, um *time-loop infinito*).

```
1 SinOsc s => dac;
2
3 while( true ) {
4     2::second => now;
5 }
```

Listagem 2.11: Reproduzir um oscilador infinitamente

Neste caso o nosso *time-loop* não faz nada senão esperar continuamente. Mas a sua utilidade é revelada quando vemos que podemos mudar as propriedades do som gerado ao longo do tempo. Por exemplo, podemos verificar que para além de conectar o oscilador ao dispositivo áudio, também lhe demos um nome **s**. Assim conseguimos usar esse nome para alterar, dentro do ciclo, a sua frequência, por exemplo, de dois em dois segundos, como vemos na listagem 2.12.

```
1 SinOsc s => dac;
2
3 while( true ) {
4     2::second => now;
5     Std.rand2f(30.0, 1000.0) => s.freq;
6 }
```

Listagem 2.12: Reproduzir um oscilador, variando a frequência a cada 2 segundos

Neste caso geramos um valor aleatório entre 30.0 e 1000.0, e associamos esse valor à frequência do gerador utilizado. Para já temos apenas agendado a execução do código a cada dois segundos. Mas

podemos avançar o tempo por qualquer duração, para um tempo específico, ou até avançar o tempo com a precisão de *sub-samples*.

```

1  1::second => now;
2  100::ms => now;
3  1::samp => now;
4  .024::samp => now;

```

Listagem 2.13: Exemplos de instruções de avanço no tempo

Mas algo bastante interessante sobre a variável **now** é que pode esperar não só por durações de tempo pré-definidas, mas também por eventos interativos que não sabemos quando irão acontecer. É desta forma que é implementada a interatividade com o teclado do computador, por exemplo, ou até mesmo com portas MIDI.

```

1  Hid hi; HidMsg msg;
2
3  0 => int device;
4  if( me.args() ) me.arg(0) => Std.atoi => device;
5
6  if( !hi.openKeyboard( device ) ) me.exit();
7  <<< "keyboard '" + hi.name() + "' ready", "" >>>;
8
9  while( true ) {
10     hi => now;
11
12     while( hi.recv( msg ) ) {
13         if( msg.isButtonDown() ) { <<< "down:", msg.key >>>; }
14         else { <<< "up:", msg.key >>>; }
15     }
16 }

```

Listagem 2.14: Exemplos de instruções de avanço no tempo

O exemplo é bastante grande e verboso, e vai de encontro à nossa opinião sobre, apesar de a linguagem permitir interagir com teclados, a definição desta interação por parte do programador é de bastante baixo nível. Se quisermos ter ações associadas a diferentes teclas, temos de construir estruturas de controlo para decidir qual das teclas foi premida e o que fazer em cada caso. Então se quisermos reagir não só a uma tecla, mas a uma tecla com modificadores (por exemplo Ctrl Shift T) temos de guardar manualmente o estado das teclas premidas e saber quando podemos despoletar a ação. Isto porque parece que neste aspeto, a linguagem segue um padrão de código imperativo, em vez de declarativo.

Para além disso, se quiséssemos associar algumas ações a teclas do computador, e outras a teclas de um piano MIDI, teríamos de manualmente abrir os dois dispositivos, e depois arranjar alguma forma

de esperar concorrentemente pelos eventos de ambos (possivelmente usando uma *shred* diferente para cada dispositivo).

Em conclusão, não é uma interface agradável para quem queira fazer algumas rápidas experimentações musicais, principalmente alguém que seja músico e não um programador mais experiente.

2.1.6 Sonic Pi

Possivelmente a linguagem que mais se aproxima do objetivo pretendido com este projeto, **Sonic Pi** [1] [18] descreve-se como uma ferramenta de código para a criação e performance de música.

A linguagem permite tocar notas (e também construções mais complexas a partir das mesmas, tais como acordes, arpeggios e escalas, por exemplo). Para além disso permite tocar *samples*, que são ficheiros [Waveform Audio File Format \(WAV\)](#). A linguagem já traz consigo aproximadamente 164 *samples* que podem ser livremente usadas, mas é também possível ao utilizador usar as suas próprias.

As músicas são compostas por **live loops**, que são grupos de sons que podem estar a tocar simultaneamente. Dentro de cada *live loop* o utilizador pode usar a função `play` para tocar notas, `sample` para reproduzir ficheiros [WAV](#), ou `sleep` para avançar o tempo. Para além disso a linguagem suporta, através da função `with_fx` a reprodução de sons com efeitos (como *reverb*, *pan*, *echo* entre muitos outros [19]).

Para além das capacidades musicais, a linguagem disponibiliza numa sintaxe similar a *Ruby*, construções de programação como ciclos, variáveis, estruturas de controlo condicionais e até métodos para adicionar aleatoriedade à música tocada, permitindo escolher, por exemplo, qual a nota a tocar a partir de uma lista de possibilidades.

Apesar de todas estas funcionalidades disponibilizadas, existem áreas onde o *Sonic Pi* fica aquém dos objetivos pretendidos para este projeto. Por exemplo, apesar de permitir tanto receber como enviar eventos [MIDI](#), as suas capacidades de [Input/Output \(I/O\)](#) são bastante primitivas. Também não é fácil utilizar o teclado do computador para tocar sons ou manipular o estado do programa. É possível fazê-lo, mas é bastante mais complicado do que seria de esperar (para além de exigir utilizar alguma linguagem de programação à parte). A sintaxe de declaração de notas favorece acompanhamentos gerados proceduralmente, mas é muito verbosa para tocar manualmente acompanhamentos com mais que algumas notas seguidas.

2.1.6.1 Exemplos

```
1 loop do
2   sample :perc_bell, rate: (rrand 0.125, 1.5)
3   sleep rrand(0, 2)
4 end
```

Listagem 2.15: Reproduzir um *sample* com valores aleatórios

Neste exemplo, podemos ver como a linguagem *Sonic Pi* permite criar um *loop*, onde podemos tocar sons (neste caso, um sample pré-definido chamado `perc_bell`).

É possível verificar também o uso da função `sleep` para gerir manualmente o avanço temporal da música (neste caso usando um valor escolhido aleatoriamente e entre 0 e 2 segundos).

```

1 with_fx :reverb, mix: 0.2 do
2   loop do
3     play scale(:Eb2, :major_pentatonic, num_octaves: 3).choose, release: 0.1, amp: rand
4     sleep 0.1
5   end
6 end

```

Listagem 2.16: Reproduzir um notas de uma escala aleatórias, com efeito *reverb*

Neste exemplo podemos observar a possibilidade do uso de efeitos, em particular do efeito *reverb*, para manipular o som gerado pelo programa. Dentro do *loop*, é tocada uma nota a cada 100 milissegundos. A função `scale` gera uma lista com as notas da escala pedida, e a função `choose` escolhe aleatoriamente uma dessas notas para tocar.

2.2 Gramáticas

Para além dos aspetos técnicos da geração e reprodução de música já abordados neste relatório, existe também um componente fulcral relativo à análise e interpretação da linguagem que irá controlar a geração dos sons. Uma das primeiras decisões a ser tomada diz respeito à escolha do *parser*, e possivelmente, do tipo de gramática que irá servir de base para a geração do mesmo.

Tradicionalmente, as gramáticas mais populares no campo de processamento de texto tendem a ser [Context Free Grammar \(CFG\)](#), que são usadas como *input* nos geradores de *parser* mais populares (Bison/YACC, ANTLR). Existem no entanto alternativas, algumas até mais recentes, como as [Parsing Expression Grammar \(PEG\)](#), que trazem consigo diferenças que podem ser consideradas por alguns como vantagens ou desvantagens.

2.2.1 Diferenças: CFG vs PEG

A diferença com maiores repercussões práticas entre as duas classes de gramáticas deve-se à semântica atribuída ao operador de escolha, e a consequente **ambiguidade** (ou falta dela) na gramática. Nas gramáticas [PEG](#), o operador é ordenado, o que significa que a ordem por que as alternativas aparecem é relevante durante o *parsing* do *input*. Isto contrasta com a semântica nas [CFG](#), onde a ordem das alternativas é irrelevante. Isto pode no entanto levar a ambiguidades, onde o mesmo *input*, descrito pela mesma gramática, pode resultar em duas árvores de *parsing* diferentes, se satisfizesse mais do que um dos ramos do operador de escolha. Isto é, as [CFG](#) podem por essa razão ser ambíguas.

Tomemos como exemplo o famoso problema do *dangling else* [6] descrito nas duas classe de gramáticas:

```
1  if (a) if (b) f1(); else f2();
```

Listagem 2.17: Gramática

```
1  statement = ...
2    | conditional_statement
3
4  conditional_statement = ...
5    | IF ( expression ) statement ELSE statement
6    | IF ( expression ) statement
```

No caso de uma CFG, sabendo que o operador de escolha `|` é comutativo, o seguinte *input* será ambíguo, podendo resultar num *if-else* dentro do *if* ou num *if* dentro de um *if-else*.

Mas no caso de uma PEG, o resultado é claro: um *if-else* dentro de um *if*. Quando a primeira regra do condicional chega ao *statement*, este vai por sua vez chamar o não terminal `conditional_statement`, que por sua vez irá consumir o *input* até ao fim. Deste modo, quando a execução voltar ao primeiro `conditional_statement`, esta irá falhar por não conseguir ler o *else* (uma vez que já consumimos todo o texto de entrada). Irá depois ir usar a segunda alternativa, dando então o resultado previsto.

Com este exemplo de *backtracking* podemos também verificar um problema aparente nas gramáticas PEG. Falhando a primeira alternativa na produção `conditional_statement`, a segunda irá ser testada. Mas é evidente, olhando para a gramática que a segunda alternativa é exatamente igual à parte inicial da primeira alternativa (que neste caso também corresponde à parte que teve sucesso). Em vez de voltar a testar as regras de uma forma *naive*, as *Parsing Expression Grammar* guardam antes em *cache* os resultados de testes anteriores, permitindo assim uma pesquisa em tempo linear relativamente ao tamanho do *input*, à custa de uma maior utilização de memória.

2.2.2 Resumo

Em resumo, as três principais diferenças entre as tradicionais *Context Free Grammar* (CFG) e as mais recentes *Parsing Expression Grammar* (PEG) são:

Ambiguidade. O operador de escolha ser comutativo nas CFG resulta em gramáticas que podem ser ambíguas para o mesmo *input*. As PEG são determinísticas, mas exigem mais cuidado na ordem das produções, uma vez que tal afeta a semântica da gramática.

Memoization Para evitar *backtracking* exponencial, as PEG utilizam *memoization* que lhes permite guardar em *cache* resultados parciais durante o processo de *parsing*. Isto reduz o tempo dispendido, pois evita fazer o *parse* do mesmo texto pela mesma regra duas vezes. Mas também aumenta o consumo de memória, pois os resultados parciais têm de ser guardados até a análise terminar por completo.

Composição As *Parsing Expression Grammar* também têm a vantagem de oferecerem uma maior facilidade de composição. Em qualquer parte da gramática é possível trocar um terminal por um não terminal. Isto é, é extremamente fácil construir gramáticas mais modulares e compô-las entre si.

2.3 SoundFonts

O formato *SoundFont* foi originalmente desenvolvido nos anos 90 pela empresa E-mu Systems para ser usado inicialmente pelas placas de som *Sound Blaster*. Ao longo dos anos o formato sofreu diversas alterações, encontrando-se atualmente na versão 2.04, lançada em 2005 [20]. Atualmente existem diversos sintetizadores de software *cross platform* e *open source* capazes de converterem eventos *MIDI* em som usando ficheiros *SoundFont*, dispensando a necessidade de uma placa de som compatível com o formato. Alguns destes projetos são TiMidity++ [21], WildMIDI [24] e FluidSynth [12].

Para além do formato original, existem também alternativas mais recentes que disponibilizam mais funcionalidades na sua especificação, como os ficheiros **SFZ** ou **NKI**. Estas alternativas trazem consigo vantagens e desvantagens, mas independentemente dos seus méritos, até agora nenhuma atingiu a popularidade dos ficheiros *SoundFont*, o que significa também menos bibliotecas e menos aplicações para trabalhar com elas.

Um ficheiro de *SoundFont* [rossum1995soundfont] é constituído por um ou mais bancos (*banks*) (até um máximo de 128). Cada banco pode por sua vez ter até 128 *presets* (por vezes também chamados instrumentos ou programas).

Usando a sintaxe de declaração de tipos do *Python* (que irá ser usada mais vezes neste projeto), podemos declarar um *SoundFont*, de uma forma bastante genérica e omitindo detalhes não essenciais, como sendo modelado pelos seguintes tipos:


```

1  # Cada preset e identificado por um par: (bank, preset number)
2  SoundFont = Dict[ Tuple[ int, int ], Preset ]
3
4  # Cada instrumento e identificado por um inteiro entre 0 e 127
5  Preset = Dict[ int, Instrument ]
6
7  # Finalmente, cada sample e identificada pelo indice de nota (que iremos abordar mais a
   ↪ frente em detalhe, no capitulo sobre sintetizadores)
8  Instrument = Dict[ int, Sample ]
9
10 # Aqui nao se encontram detalhados os tipos Wave nem SampleOptions.
11 Sample = Tuple[ Wave, SampleOptions ]

```

Listagem 2.18: Sistema de Tipos de um ficheiro SoundFont

2.4 Sintetizadores

A biblioteca FluidSynth é um *software* sintetizador de áudio em tempo real que transforma dados MIDI em sons, que podem ser gravados em disco ou encaminhados diretamente para um *output* de áudio. Os sons são gerados com recurso a SoundFonts [20] (ficheiros com a extensão `.sf2`) que mapeiam cada nota para a gravação de um instrumento a tocar essa nota.

Os *bindings* da biblioteca para Python foram baseados no código *open source* do projeto **pyfluidsynth** [23], juntamente com algumas definições CPython extra para permitir usar funções que não tivessem *bindings* já criados.

2.4.1 Inicialização

Para utilizar a biblioteca FluidSynth, existem três objetos principais que devem ser criados: `Settings` (`fluid_settings_t*`), `Synth` (`fluid_synth_t*`) e `AudioDriver` (`fluid_audio_driver_t*`).

O objeto **Settings** [13] é implementado com recurso a um dicionário. Para cada chave (por exemplo, `“audio.driver”`) é possível associar um valor do tipo inteiro (`int`), *string* (`str`) ou *double* (`num`). Alguns valores podem ser também booleanos (`bool`), no entanto eles são armazenados como inteiros com os valores aceites sendo apenas 0 e 1.

O objeto **Synth** é utilizado para controlar o sintetizador e produzir os sons. Para isso é possível enviar as mensagens MIDI tais como `NoteOn`, `NoteOff`, `ProgramChange`, entre outros.

O terceiro objeto **AudioDriver** encaminha automaticamente os sons para algum *audio output*, seja ele colunas no computador ou um ficheiro em disco. Os seguintes *outputs* são suportados pela biblioteca:

Linux: jack, alsa, oss, PulseAudio, portaudio, sdl2, file

Windows: jack, PulseAudio, dsound, portaudio, sdl2, file

Max OS: jack, PulseAudio, coreaudio, portaudio, sndman, sdl2, file

Android: opensles, oboe, file

2.4.2 Utilização

Com os objetos necessários inicializados, é necessário ainda especificar qual (ou quais) a(s) *SoundFont(s)* a utilizar. Para isso podemos chamar o método `Synth.LoadSoundFont` que recebe dois argumentos: uma *string* com o caminho em disco do ficheiro *SoundFont* a carregar, seguido dum booleano que indica se os *presets* devem ser atualizados para os da nova *SoundFont* (isto é, atribuir os instrumentos da *SoundFont* aos canais automaticamente).

A função `Synth.NoteOn` recebe três argumentos: um inteiro a representar o canal, outro inteiro entre 0 e 127 a representar a nota, e finalmente outro inteiro também entre 0 e 127 a representar a velocidade da nota.

O canal (**channel**) representa qual o instrumento que vai reproduzir a nota em questão. Cada canal está atribuído a um programa da *SoundFont*, e é possível a qualquer momento mudar o programa atribuído a qualquer canal através do método `Synth.ProgramChange`. Caso se tenha carregado mais do que uma *SoundFont*, é possível usar o método `Synth.ProgramSelect`, que permite especificar o id da *SoundFont* e do banco do instrumento a atribuir.

A chave (**key**) representa a nota a tocar. Sendo este valor um inteiro entre 0 e 127, é necessário saber como mapear as tradicionais notas musicais neste valor. Para isso, basta colocarmos as *pitch classes* e os seus respetivos acidentais *sharp* numa lista ordenada (C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, B) e associar a eles os inteiros entre 0 e 11 (inclusive). Depois apenas temos de somar a esse número a multiplicação da oitava da nota (a começar em 0) por 12. Podemos deste modo calcular, por exemplo, que a *key* do C central (C4) é igual a 48 (0 + 4 * 12). Assim, podemos generalizar que para uma oitava *O* e para um tom de nota *N*, obtemos a chave aplicando a fórmula:

$$N + O * 12$$

A velocidade (**velocity**) é também um valor entre 0 e 127. Relacionando a velocidade com um piano físico, esta representa a força (ou velocidade) com que a tecla foi premida. Velocidades maiores geram sons mais altos, enquanto que velocidades mais baixas geram sons mais baixos, permitindo assim ao músico dar ou tirar ênfase a uma nota relativamente às restantes. De notar que um valor igual a zero é o equivalente a invocar o método `Synth.NoteOff`.

A método `Synth.NoteOff`, por sua vez, recebe apenas dois argumentos (canal e chave), e deve ser chamada passando algum tempo para terminar a nota. Podemos deste modo construir a analogia óbvia que o método `NoteOn` corresponde a uma tecla de piano ser premida, e `NoteOff` corresponde a essa tecla ser libertada.

O problema e os seus desafios

Desenhar esta [Domain Specific Language \(DSL\)](#) trás consigo os problemas comuns ao desenho de linguagens de programação, bem como desafios novos e únicos relativos ao domínio musical. Alguns desses desafios foram já bastante estudado pela miríade de linguagens de programação, tanto industriais como académicas, que já foram desenvolvidas, pelo que não serão o foco principal deste projeto. Pelo contrário, neste projeto serão focados com mais detalhe os desafios resultantes da integração da componente musical na linguagem.

O primeiro desses desafios é a introdução de um novo tipo de dados primitivo não existente na maioria das outras linguagens: **Música**. Este tipo de dados trás consigo a necessidade implícita de gerir o conceito de **tempo** na linguagem, tanto na geração de música *realtime* como *offline* (em que o tempo a que a música está a ser gerada pode ser mais rápido ou mais lento do que o tempo real). Este conceito de tempo também acaba por escapar para o campo da gramática e da sintaxe da linguagem, necessitando de uma forma de descrição do mesmo que seja flexível, mas não demasiado verbosa ou difícil de ler.

Ainda relacionado com o tipo de dados *Música*, também é importante pensar em como o representar, e os casos que deve cobrir. Para este fim, acho que é importante a linguagem permitir gerar sons **potencialmente infinitos**. Esta funcionalidade não é tão útil no campo da geração de música *offline*, mas é extremamente útil quando a música está a ser gerada em tempo real, e possivelmente a ser controlada por um utilizador através do teclado, permitindo começar a tocar música gerada proceduralmente, e deixá-la tocar durante o tempo que for necessário. Como tal é necessário pensar em como a implementação de todo o código depende deste ponto.

3.1 Objetivos

Nós podemos assim sumarizar os objetivos principais para a nossa linguagem da seguinte forma:

- **Declarativa** As sequências musicais devem ser descritas de uma forma declarativa (em vez de imperativa).
- **Dinâmica** Introduzir conceitos matemáticos ou de programação, tais como funções e variáveis, para a área musical.
- **Interatividade** Tornar possível criar teclados interativos diretamente a partir da linguagem, e que integrem facilmente com o resto das funcionalidades disponibilizadas.
- **Lazyness** Tornar *lazyness* a predefinição para as sequências musicais, gerando apenas os eventos estritamente necessários quando são necessários.
- **Eventos Variados** As sequências musicais devem poder descrever acompanhamentos musicais complexos, contendo notas singulares, pausas, acordes, *arpeggios*, vozes, e mais.
- **Múltiplos Inputs** Para além de permitir que os acompanhamentos musicais sejam descritos na nossa linguagem, também deve ser possível que eles sejam importados ou convertidos de diferentes fontes, como dispositivos ou ficheiros *MIDI*.
- **Múltiplos Outputs** Guardar ou escrever para diferentes *outputs*, os eventos que forem gerados pela nossa aplicação.
- **Extensibilidade** Tornar simples o processo de estender e customizar o projeto, sem ser necessário passos como clonar o projeto, recompilar ou modificar o seu código interno.

3.2 Solução Proposta

A linguagem irá ser desenvolvida em *Python*. A linguagem irá ser extensível, permitindo ao utilizador definir objetos ou funções em *Python* e expô-los para dentro da linguagem, dando assim acesso à grande quantidade de módulos já existentes para os mais variados fins.

Como exemplo da extensibilidade da linguagem, irá também ser desenvolvido por cima dela uma biblioteca de construção de teclados virtuais que permitem associar a eventos de teclas notas ou sequências musicais, ou mesmo instruções a serem executadas na própria linguagem.

Para resolver o problema da representação do tempo, toda a linguagem irá ter noção implícita desse conceito, mesmo que apenas algumas construções o utilizem. Isto significa que durante toda a execução, haverá uma variável de **contexto** que será implicitamente passada para todas instruções e todas as chamadas de funções que, entre outras coisas, irá manter registo da passagem do tempo. Desta forma os construtores que precisarem do contexto, como por exemplo a emissão de notas musicais, podem aceder ao tempo atual bem como modificá-lo.

A existência deste **contexto** implícito significa que as funções *Python* não podem ser expostas diretamente para a linguagem, mas graças à expressividade do *Python* é possível construir uma *Foreign*

Function Interface que seja incrivelmente simples de usar e que evite que o utilizador tenha de mapear as funções manualmente. Em vez disso, pode simplesmente marcá-las como sendo **context-free** (funções que não têm noção da existência do contexto implícito), e elas serão então tratadas de forma apropriada.

O tipo de dados **Música** irá ser implementado sobre o conceito de iteradores (e mais especificamente geradores) fornecido pelo *Python* para tornar a criação de música *lazy*. No entanto, este paradigma deve ser completamente opaco para o utilizador da linguagem: a decisão de usar o modelo de execução normal, ou funções geradores deve ser tomado em segundo plano pelo motor de execução da linguagem, sempre que este for necessário. Isto é, ao contrário da maioria das linguagens que exigem para a utilização de geradores que o utilizador declare explicitamente que quer "emitir" um valor através de alguma *keyword*, geralmente `yield`, na nossa linguagem sempre que alguma função produzir um valor do tipo de música que não seja consumido de alguma forma (atribuído a uma variável ou passado a uma função, por exemplo), esse valor musical é **implicitamente emitido** para o gerador, uma vez que esse caso será o mais comum. Para evitar que o valor seja emitido, é necessário **descartá-lo manualmente** onde for caso disso. Se por outro lado a função lidar apenas com valores não-musicais, a sua execução irá seguir o modelo tradicional (onde a função termina a sua execução antes de retornar o controlo ao local onde foi chamada).

3.2.1 Gramática da Linguagem

A gramática completa da linguagem pode ser vista no Anexo .1. Mas antes de abordarmos em mais detalhe como irá der desenhada a gramática da linguagem, podemos abordar dois pequenos exemplos que demonstram a geração de notas musicais.

```

1  V70 L1 T120;
2
3  fun melody () {
4  V120;
5
6  r/4 ^g/4 ^g/4 ^g/4;
7  ^f/2 e/8 ^d3/8;
8  ^c2;
9  }
10
11 fun accomp () {
12 V50; sustainoff();
13
14 ^Cm;
15 BM;
16 AM;
17 }
18
19 # Create the notes from a melody with a piano and accompany it with a violin in parallel
20 $notes = :piano melody() | :violin accomp();
21
22 # Play the notes twice
23 play( $notes * 2 );

```

Listagem 3.1: Exemplo da sintaxe proposta da linguagem

O desenho da gramática da linguagem é composto aproximadamente por três partes, todas elas interligadas entre si.

Instruções e Declarações Similar a quase todas as linguagens de programação, esta parte cobre a declaração de funções, variáveis, operadores e expressões em geral.

Acompanhamentos Musicais Um tipo de expressões especial, que em vez de produzir números ou *strings* literais, reconhece expressões musicais (notas, acordes, etc).

Teclados Virtuais Açúcar sintático para facilitar a declaração de teclados virtuais. Para a lém de alguns construtores próprios, faz uso das expressões gerais e de acompanhamentos musicais descritas acima.

3.2.1.1 Instruções e Expressões

As instruções e expressões da gramática são baseadas nas linguagens como C e JavaScript. Chavetas são usadas para delinear blocos de código. As variáveis são prefixadas com um dólar (\$) para prevenir ambiguidades com notas musicais. Cada instrução é separada com um ponto e vírgula (;) a menos que sejam blocos de código que terminem com o fechar de chavetas. Os parâmetros de funções são separados por vírgulas, mas como as vírgulas também são usadas para indicar a descida de oitava nas notas, o ponto e vírgula (;) pode ser usado nesses casos para prevenir ambiguidades.

Em termos de instruções suportadas, a linguagem irá ter as usuais:

Declaração de Funções `fun function_name ($arg1, $arg2, <...>) { }`

Ciclos While `while (<condition>) { }`

Ciclos For `for ($var in <expr>) { }`

Condicionais If `if (<condition>) { } else { }`

Atribuições a Variáveis `$var = <expr>;`

Chamada de Funções `function_name(<arg1>, <arg2>, <...>, named_arg = <arg_n>);`

3.2.1.2 Acompanhamentos Musicais

A gramática de expressões ou acompanhamentos musicais tem como base fundamental os seguintes blocos: notas, pausas e modificadores. As notas são identificadas pelas letras A até G, seguindo a notação de *Helmholtz*[15] para denotar as respectivas oitavas. Podem também ser seguidas de um número ou de uma fração, indicando a duração da nota.

```
1 C,, C, C C c c' c'' c''' c'/4 A1/4 B2
```

Listagem 3.2: Exemplos de notas

As notas podem depois ser compostas **sequencialmente** (como demonstrado em cima, em que cada nota avança o tempo pelo valor da sua duração) ou em **paralelo** (separados por uma barra vertical |, criando uma bifurcação do contexto em dois, que irão correr em paralelo). Devemos notar que o operador paralelo tem a menor precedência de todos, pelo que não é necessário agrupar as notas com parênteses quando se usa. Isto é, as duas expressões seguintes são equivalentes.

```
1 A B C | D E F
2 ( A B C ) | ( D E F )
```

É também possível agrupar estes blocos com recurso a parênteses. Os grupos herdam o contexto da expressão superior, mas as modificações ao seu contexto permanecem locais. Isto permite, por exemplo, modificar configurações para apenas um conjunto restrito de notas. No exemplo seguinte, a velocidade da nota C é 70, mas para o grupo de notas A B a velocidade é 127.

```
1 v70 (v127 A B) C
```

Os modificadores disponíveis são:

Velocity A velocidade das notas, tendo o formato `[vV][0-9]+`.

Duração A duração das notas, tendo o formato `[lL][0-9]+` ou `[lL][0-9]+/[0-9]+`.

Tempo O número de batidas por minuto (BPM) que definem a velocidade a que as notas são tocadas, tendo o formato `[tT][0-9]+`.

Assinatura de Tempo Define a assinatura de tempo, que define o tipo de batida da música e o comprimento de uma barra na pauta musical. Tem o formato `[sS][0-9]+/[0-9]+`.

Oitava Permite mudar qual a oitava base (por predefinição 4). Tem o formato `[oO][0-9]`.

Instrumento Qual o identificador numérico do instrumento (a começar em um) a utilizar (regra geral, seguindo o standart General MIDI). Segue o formato `[iI][0-9]+`.

É também possível definir qual o instrumento a ser utilizado para as notas. Todas as notas pertencentes ao mesmo contexto depois do modificador utilizarão esse instrumento.

```
1 (:cello A F | :violin A D)
```

Para além destas funcionalidades, também existe algum açúcar sintático para algumas das tarefas mais comuns na construção de acompanhamentos, como tocar acordes ou repetir padrões.

```
1 ( [BG]*2 [B2G2] ) *3
```

3.2.1.3 Teclados Virtuais

Para além de permitir declarar acompanhamentos musicais para serem tocados automaticamente, a linguagem permite declarar teclados virtuais. Associados às teclas do teclado podem estar notas, acordes, melodias, ou qualquer outro tipo de expressão suportado pela linguagem.

```
1 # Now an example of the keyboard. We can declare variables to hold state
2 $octave = 0;
3
4 $keyboard = @keyboard hold extend (v120) {
5   # Keys can be declared to play notes
6   a: C; s: D; d: E; f: F; g: G; h: A; j: B;
7   # Or chords
8   1: [^Cm]; 2: [BM]; 3: [AM];
9 }
```



```

10  # Or any other expression, including code blocks that change the state
11  z: { $octave -= 1; };
12  x: { $octave += 1; };
13  }
14
15  # The set_transform function allows changing all events before they are emitted by this
   ↪ keyboard
16  $keyboard::map( fun ( $k, $events ) => $events + interval( octave = $octave ) );

```

Listagem 3.3: Exemplo da sintaxe de teclados virtuais

Cada teclado aceita opcionalmente uma lista de modificadores, tais como:

hold Começa a tocar quando a tecla é premida e acaba de tocar quando é solta

toggle Começa a tocar quando a tecla é premida, e acaba de tocar quando ela é premida novamente

repeat Quando a nota/acorde/música fornecida acaba de tocar, repete-a indefinidamente

extend Em vez de tocar as notas de acordo com a sua duração, estende-as todas até a tecla ser levantada/premida novamente (quando usado em conjunto com **hold** ou **toggle**, respetivamente)

Também é possível passar uma expressão opcional entre parênteses que irá ser aplicada a todas as notas do teclado (no exemplo acima especificando um instrumento e o volume das notas com `(:violin v120)`), evitando assim ter de a repetir em vários sítios.

Para além disso, será possível controlar muitos mais aspetos do teclado atribuindo-o a uma variável e chamando funções a partir daí, como por exemplo efetuar transformações nos eventos e notas emitidos, ou simular o carregar e soltar das teclas.

```

1  # The set_transform function allows changing all events before they are emitted by this
   ↪ keyboard
2  $keyboard::set_transform( $events => transpose( $events, octave = $octave ) );
3  # It is possible to synchronize the keyboard with a grid to align the timings of key presses
4  # and releases to said grid
5  $keyboard::set_grid( Grid::new( 1, 4 ) );
6  # We can also control the keys manually
7  $keyboard::start( "ctrl+z" );
8  $keyboard::stop_all();

```

Listagem 3.4: Exemplo da sintaxe proposta da linguagem

3.2.2 Arquitetura do Sistema

O sistema irá ser composto por um interpretador de linguagem desenvolvido em Python, acompanhado por uma interface de linha de comandos que faça uso do interpretador.

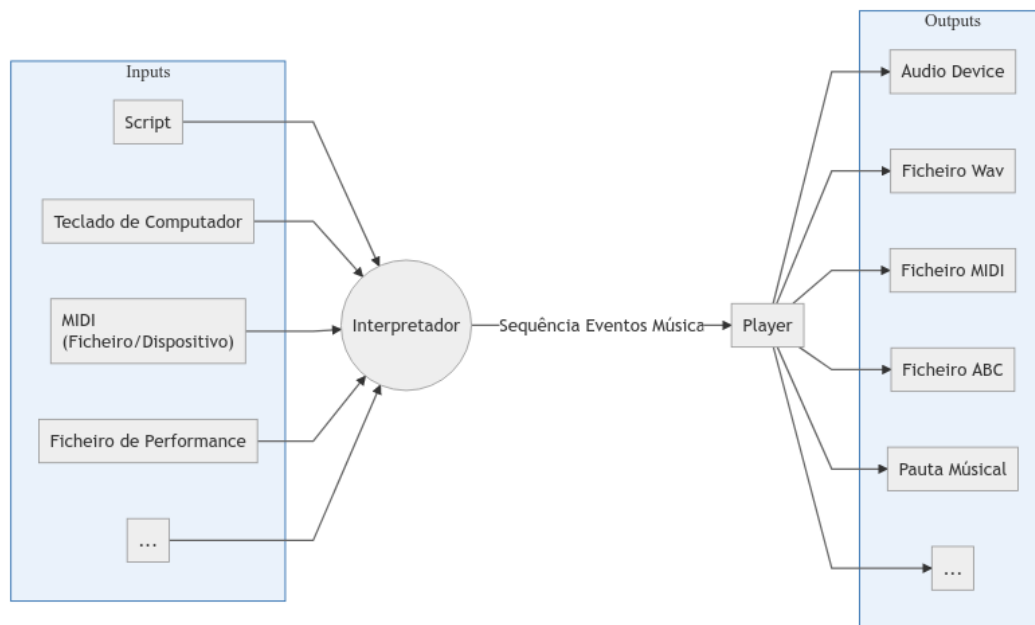


Figura 3.1: Arquitectura Geral do Projeto

O interpretador receberá um *script* obrigatório como input. Esse input poderá depois determinar quais os *inputs* (opcionais) que irá usar, como o teclado do computador, ficheiros ou teclados **MIDI**, ficheiros de performance (gravações de reproduções anteriores consistindo nos eventos em que as teclas foram premidas).

Os eventos gerados pelo *script* e os restantes *inputs* serão depois redirecionados para os diversos *outputs*, que podem ser as colunas do dispositivo, ficheiros **WAV** ou **MIDI**, ficheiros em formato PDF com a pauta musical, entre outros.

Toda a linguagem irá ser desenvolvida com extensibilidade em mente nos seguintes pontos:

Inputs Permitir a criação de novos *inputs*, como estar à espera de mensagens por um *socket* ou de outros processos do computador.

Eventos A linguagem já disponibiliza uma variedade de eventos multimédia (como reproduzir notas, sons genéricos, ou mensagens para controlar dispositivos **MIDI**). Mas o objetivo é que criar e emitir eventos customizados seja extremamente simples (e feito com uma só linha de código por evento, no mínimo). Obviamente, nem todos os eventos são suportados por todos os *outputs* (por exemplo, um ficheiro ABC não pode reproduzir um ficheiro **WAV**), mas neste caso os diversos *outputs* irão simplesmente ignorar os eventos que não estejam preparados para lidar.

Outputs Para além dos *outputs* embutidos, permitir criar novos, tanto para outros formatos musicais, mas também para outros fins como controlar luzes, vídeo e imagens através da linguagem (em conjunto com os eventos personalizados) e permitir assim executar espectáculos multimédia completos a partir da linguagem.

Bibliotecas Expôr funções, variáveis e objetos adicionais, bem como possivelmente acrescentar dinamicamente sintaxe à linguagem (através de macros).

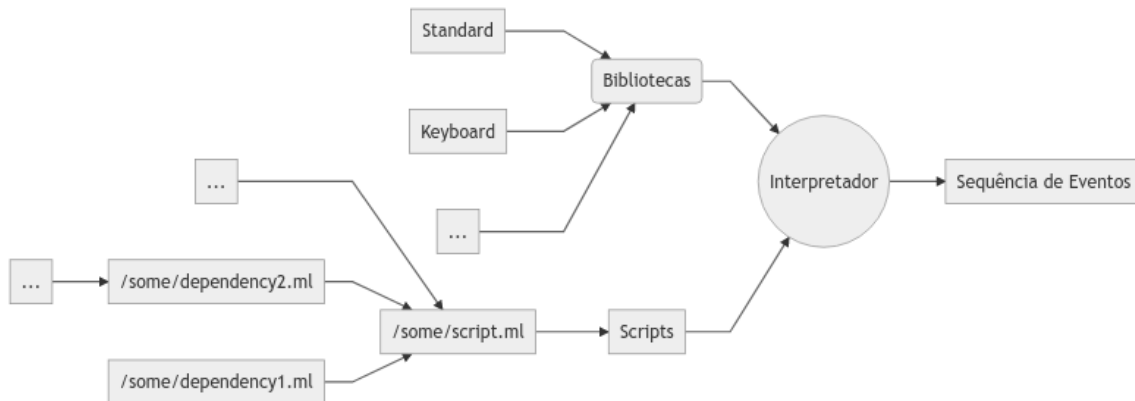


Figura 3.2: Arquitectura do Interpretador

O facto de a linguagem ser desenvolvida em *Python* significa que é extremamente prático estender a mesma devido a:

- Ubiquidade da linguagem Python tanto para programadores experientes como para iniciantes;
- Não ser necessário compilar o código para o executar;
- Sintaxe e expressividade da linguagem (apesar de vezes isso incorrer num custo de performance);
- Existência de *bindings* para bibliotecas desenvolvidas em C/C++ (como *numpy*), optimizadas para inúmeras tarefas que necessitem de maior *performance*/menor latência, que mesmo assim expõem uma interface agradável de usar em *Python*;

3.2.3 Álgebra Musical

Dentro da própria linguagem, e acompanhado das construções de programação como ciclos, variáveis, condicionais e tudo o resto, queremos disponibilizar uma *álgebra* que envolva tanto a parte musical como dos teclados e que permita de certa forma manipulá-los. Para isso, a linguagem tem os seguintes tipos de dados (entre outros):

Descrição

Tipo

Sequências de Notas, Acordes, WAVes, etc	Music
Oitavas, tons, semitons	Interval
Metadados (compasso, batidas por minutos, etc)	Voice
Dicionário de Tecla -> Música ou Função	Keyboard

Para operar entre estes tipos, existem um conjunto de operações que são tão comuns que merecem ser implementadas através de operadores sintáticos. Devemos notar que o mesmo operador pode ser usado para ações diferentes com base nos tipos dos seus operandos. Sendo a nossa linguagem dinâmica, este tipo de *overloading* deve acontecer em *runtime*.

Função	Operador
concat (Music, Music) -> Music	a b
parallel (Music, Music) -> Music	a b
arpeggio (Chord, Pattern) -> Music	a * b
repeat (Music, Int Bool) -> Music	a * b
transpose (Music, Interval Int) -> Music	a + b
retime (Music, Music Float) -> Music	a ** b
union (Keyboard, Keyboard) -> Keyboard	a + b
exclusion (Keyboard, Keyboard) -> Keyboard	a - b

Para além dos operadores disponibilizados, existe um conjunto de funções que permite transformar e compor de maneiras mais avançadas objetos dos variados tipos. Algumas dessas funções (com as assinaturas simplificada relativamente à sua função real, para efeitos de claridade) são listadas de seguida:

Descrição	Função
Leitura de MIDI	readmidi(File Port) -> Music
Gravação de uma <i>performance</i>	keyboard\record(File)
Reprodução de uma <i>performance</i>	keyboard\replay(File)
Leitura de uma <i>performance</i>	keyboard\readperf(File) -> Music
Gravação de Música	save(Music, File...)
Transformar Teclados	map(Keyboard, Fn) -> Keyboard
Filtrar Teclados	filter(Keyboard, Fn) -> Keyboard
Transformar Música	map(Music, Fn) -> Music
Filtrar Música	filter(Music, Fn) -> Music
Cortar Música	slice(Music, Start, End) -> Music

Casos de Estudo

Neste capítulo iremos analisar possibilidades de uso da linguagem. Alguns desses exemplos são até já parcialmente ou totalmente funcionais quando executados no protótipo desenvolvido nesta fase inicial. Outros exemplos fazem uso de funcionalidades planeadas mas ainda não implementadas, e que serão devidamente identificados quando necessário. Nestes exemplos podem também ser usados pequenos excertos de músicas para demonstrar a utilização da linguagem, e a forma como esses excertos podiam ser representados com a nossa sintaxe.

4.1 Tocar Música

```
1 # Title: Westworld Main Theme
2
3 :piano = (1; S6/8 T70 L/8 V120 );
4 :violin = :piano(41);
5
6 $chorus = :piano (A*11 G F*12 | A,6 A,5 G, F,6*2)*3;
7
8 $melody = :piano (r24 (:violin a3 c'3 d'3 e'9) r9 e'3 d'3 c'3 a9);
9
10 play( $chorus | $melody );
```

Listagem 4.1: Exemplo da sintaxe para criação de música

Nas duas primeiras linhas deste exemplo podemos verificar a utilização de duas vozes (:piano e :violin). O piano ocupa a posição 1 da *soundfont* utilizada, enquanto que o violino utiliza a posição 41. Ao declarar o piano, podemos também definir um conjunto de configurações adicionais (como o compasso, a duração base das notas, e o volume com que são tocadas). Ao declarar o violino, podemos

herdar as configurações de outro instrumento (neste caso o piano) e mudar apenas o necessário (a posição do instrumento).

Depois podemos ver a utilização de variáveis (`$chorus` e `melody`) para estruturar e guardar conjuntos de notas, neste caso. É possível ver também o quão conciso fica descrever padrões ou conjuntos de notas repetidas através do operador de repetição (`*`). O operador de paralelo (`|`) permite depois tocar notas em paralelo ao mesmo tempo.

4.2 Simples Fuga

O caso de estudo anterior mostra como é possível declarar algumas notas, e aproveitar operadores simples como a repetição para reduzir a redundância no código. Neste caso de estudo vamos um pouco mais à frente e vemos como podemos declarar uma função, que usa as suas variáveis em mais do que um sítio e de diferentes formas.

```

1 # Fugue 2 in C minor in Book I of the J.S. 'Bachs Well-Tempered Clavier
2 fun fugue ( $subj, $resp ) =>
3   ( $subj $resp | r ** $subj ( $subj + 7 ) );
4
5 S8/4 T140 L/4 V120;
6
7 $subj = r c/2 B/2 c G _A c/2 B/2 c d
8         G c/2 B/2 c d F/2 G/2 _A2 G/2 F/2;
9
10 $resp = _E/2 c/2 B/2 A/2 G/2 F/2 _E/2 D/2 C _e d c
11         _B A _B c ^F G A ^F;
12
13 play( fugue( $subj, $resp ) );

```

Listagem 4.2: Exemplo da declaração da estrutura e conteúdo de uma simples fuga de duas vozes



Figura 4.1: Generated music sheet for fugue example, audio version available [here](#)¹.

Também nos permite analisar que as músicas podem conter estruturas não imediatamente óbvias à primeira vista. A função recebe duas excertos musicais `$subj` e `$resp`, e toca-os em sequência. Mas para além disso, durante o terceiro e quarto compassos, também toca em paralelo uma versão do `$subj` transposta 7 semitons.

E este é apenas um pequeno exemplo do tipo de transformações e operações que podem ser efetuadas de modo não destrutivo sobre os acompanhamentos musicais. Se quisermos mudar alguma nota em `$subj`, quando reproduzirmos o ficheiro novamente, essa alteração irá refletir-se automaticamente na versão transposta também.

4.3 Definir um teclado

No início do capítulo **4.1.1** e **4.1.2** podemos ver um pequeno excerto de música que é tocada autonomamente pela linguagem. Aqui poderemos ver como construir um teclado virtual personalizado para tocar essa música, bem como a sequência de teclas a premir para a reproduzir.

```

1 # Title: Soft to Be Strong
2 # Artist: Marina
3 V70 L1 T120;
4
5 fun toggle_sustain ( ref $enabled ) {
6   if $enabled { cc( 64; 0 ) } else { cc( 64; 127 ) };
7
8   $enabled = not $enabled;
9 };
10
11 $sustained = true;
12
13 @keyboard hold extend {
14   a: [^Cm]; s: [BM]; d: [AM]; f: [EM]; g: [^Fm];
15 };
16
17 @keyboard hold extend (V120) {
18   1: ^c; 2: ^d; 3: e; 4: ^f; 5: ^g;
19   6: b; 7: ^c'; 8: ^d'; 9: e';
20
21   c: toggle_sustain( $sustained );
22 };

```

Listagem 4.3: Exemplo da sintaxe para criação de teclados

No início deste exemplo podemos ver a declaração de uma função **toggle_sustain**, que recebe como parâmetro uma variável por referência. O que isto significa é que qualquer alteração ao valor da variável dentro desta função, reflete-se também na variável que for passada à função quando esta é chamada.

Lá dentro fazemos uso da função `cc` que permite controlar diversos controlos [MIDI](#). Neste caso, o controlo `64` refere-se ao pedal de *sustain* de um piano (que deixa as notas a tocar durante mais algum tempo mesmo depois da sua tecla ser levantada). O valor `0` (zero) que lhe é passado significa desligar esse pedal, e o valor `127` significa ligar esse pedal. No futuro, apesar de ser sempre possível recorrer a este tipo de funções de baixo nível, irão ser adicionadas à biblioteca *standard* as funções mais comuns (como por exemplo, `sustainoff()` e `sustainon()`).

Depois podemos ver a declaração de dois teclados virtuais (a linguagem permite mais do que um teclado ativo ao mesmo tempo). O primeiro mapeia a algumas teclas (`a`, `s`, `d`, `f` e `g`) o conjunto de acordes usados nesta música. Para além disso também define alguns modificares a serem usados por este teclado (cujo significado é discutido no capítulo [3.2.1.3](#)).

O segundo teclado funciona de forma similar, atribuindo às teclas de `1` a `9` notas individuais a serem tocadas. Neste teclado podemos também ver que notas musicais não são os únicos elementos que podem ser associados a teclas. Também é possível descrever expressões arbitrarias (como neste caso, a chamada da função `toggle_sustain($sustained)` associada à tecla `c`).

Outro ponto a notar sobre o segundo teclado é a declaração entre parênteses (`V120`) que permite modificar o volume das notas tocadas por este teclado (que se sobrepõe ao volume global `V70` indicado no início do código). Isto é uma forma simples de prefixar configurações a todas as notas do teclado, evitando ter de copiar essas configurações para todas as notas.

4.4 Teclado de Arpeggios

Neste caso vamos construir um teclado mais dinâmico. Vamos associar a algumas teclas diferentes acordes. Mas em vez de tocar simplesmente esses acordes, vamos tocá-los como arpeggios aplicados a um padrão.

É importante notar que o padrão não está escrito estáticamente, mas sim guardado na variável `$pat`. Isto significa que podemos depois usar um segundo *keyboard* para controlar qual o padrão ativo. E para tornar o exemplo ainda mais divertido, usamos as setas *up* e *down* para aumentar ou diminuir a transposição das notas resultantes, dando assim mais variedade aos quatro acordes definidos.

É fácil de ver também como este teclado é extremamente versátil, e pode ser facilmente adaptado para um qualquer número de acordes e *arpeggios* que se queira utilizar.

```

1 S4/4 L/4 T132 V120;
2
3 $patterns = @[
4   C D E D2 E C2;
5   C r d' e2 r c2;
6 ];
7
8 $t = 0; $pat = $patterns::[ 0 ];
9
```



```

10 @keyboard {
11     a: [CM];
12     s: [Am];
13     d: [FM];
14     f: [Dm];
15 }::map(fun($k, $m) => $m * $pat + $t);
16
17 @keyboard {
18     1: { $pat = $patterns::[ 0 ] };
19     2: { $pat = $patterns::[ 1 ] };
20
21     up: { $t += 1 };
22     down: { $t -= 1 };
23 };

```

Listagem 4.4: Definição de um teclado de acordes

4.5 Teclado Geral com MIDI

Os dois teclados vistos até agora são interessantes quando temos um sub-conjunto específico de notas e acordes com os quais queremos tocar. Mas às vezes é interessante ter uma ferramenta mais generalizada para experimentar.

Este exemplo faz uso de funções disponibilizadas na biblioteca *standard* da linguagem para fazer isso mesmo.

- `keyboard\piano()` Cria um teclado a simular um piano com as teclas do computador. A primeira linha de teclas corresponde às teclas brancas, a segunda às teclas pretas e a terceira novamente às brancas mas uma oitava acima.
- `keyboard\midi()` Cria um teclado que está à escuta dos eventos MIDI (possivelmente de um piano externo ligado ao computador).
- De seguida também vemos que é possível fazermos *override* a algumas teclas se quisermos algo mais específico. Isto é opcional e pode ser ignorado se quisermos.
- `keyboard\bufpad()` Aqui criamos um teclado que está à escuta das teclas numéricas (de 1 até 9) e cria um *buffer* em cada uma delas. Podemos usar esses *buffers* para guardar em memória melodias que toquemos com os teclados, para depois as reproduzir quando quisermos.
- `keyboard\repl()` Finalmente criamos um último teclado que faz a tecla "`\`" ativar o editor embutido. Assim conseguimos alterar o nosso programa enquanto ele está a correr, alterar teclas, mexer nos *buffers*, declarar variáveis ou gravar os resultados das nossas experiências para disco.

```

1  # Use a "standard" keyboard piano
2  $piano = keyboard\piano();
3  # Maybe even add a MIDI piano?
4  $piano -= keyboard\midi();
5  # Or declare a custom piano
6  $piano -= @keyboard hold extend {
7      a: [^Cm]; s: [BM]; d: [AM];
8      f: [EM]; g: [^Fm];
9  };
10
11 # Declares an array that will contain our buffers
12 $bf = none;
13 # Creates a keyboard that declares a set of buffers. By default,
14 # the numpad keys are used (creating 10 available buffer slots)
15 # Save key is F8, Load key is F7
16 $piano -= keyboard\bufpad( $bf );
17 # Creates a keyboard that associates the interpreter accessible by the "\ " key
18 $piano -= keyboard\repl( ctx = getctx() );

```

Listagem 4.5: Exemplo da sintaxe proposta da linguagem

4.6 QWERTY Keyboard

No exemplo anterior utilizamos as funções fornecidas pela biblioteca *standard*. Aqui vamos ver um exemplo de como poderíamos programar as nossas próprias funções, utilizando funcionalidades mais dinâmicas (como ciclos *for*) do que simplesmente declarar cada tecla manualmente.

Neste caso estamos a criar um teclado em que cada linha de teclas começa uma oitava acima de onde a linha de baixo começou, e as teclas na mesma linha sobem um semitom cada uma.

```

1  fun qwertyboard () {
2      # Small shortcut function
3      fun ivl ($o, $s) => interval( octaves = $o, semitones = $s );
4
5      # Maps the lines on a keyboard to semitone offsets to List[ List[ str ] ]
6      $lines = @[
7          "qwertyuiop"::split(),
8          "asdfghjkl"::split(),
9          "zxcvbnm,."::split()
10     ];
11
12     $octave = 0;
13     $semitone = 0;
14

```

```

15  $keyboard = @keyboard hold extend {
16      for ( $oct, $chars in enumerate( $lines ) ) {
17          for ( $sem, $c in enumerate( $chars ) ) {
18              [ $c ]: c + ivl( -$oct, $sem );
19          };
20      };
21  }::map( fun( $k, $events ) => $events + ivl( $octave, $semitone ) );
22
23  $keyboard += @keyboard {
24      up => { $octave += 1 };
25      down => { $octave -= 1 };
26      right => { $semitone += 1 };
27      left => { $semitone -= 1 };
28  };
29
30  return $keyboard;
31 }

```

Listagem 4.6: Exemplo da sintaxe proposta da linguagem

A primeira parte da função declara um *array* com as três linhas de caracteres presentes num teclado *QUERTY*. Isto permite-nos ao declarar as teclas no *keyboard*, e fazê-lo de forma dinâmica (ao invés de associar a cada tecla uma nota manualmente).

Essa declaração, inspirada nas listas por compreensão do *Python*, funciona através de uma construção similar a um ciclo *for*. A variável *\$c* corresponde a cada item da *linha* (neste caso, cada tecla), a variável *\$sem* permite-nos obter o índice da letra atual na *linha*. A cada letra é associada a nota *c* transposta pelo índice da tecla e da linha a que pertence.

Para além disso também podemos ver a declaração de mais quatro teclas (correspondentes às quatro setas do teclado) que permitem deslocar as notas tocadas por oitavas completas ou por semitons. Para isso, estas teclas têm associadas uma expressão de bloco (identificada pelas chavetas { e }). Lá dentro é possível meter uma instrução (ou opcionalmente várias, separadas por pontos e vírgulas ;). O valor da última expressão é o valor de retorno da expressão de bloco toda, pelo que seria possível que uma tecla fizesse mais que uma coisa (alterar o estado e no fim retornar ainda notas para serem tocadas, por exemplo).

Finalmente vemos também um exemplo do método *map*, um dos vários métodos que o objeto *Keyboard* disponibiliza e que permitem modificar ainda mais o comportamento dos teclados, alterando o valor emitido por cada tecla de acordo com a função passada.

4.7 Conclusão

Com estes exemplos pudemos ver como ter uma sintaxe declarativa torna bastante compacta a descrição de acompanhamentos musicais. Mas mais do que poder descrevê-los estáticamente, o facto de podermos repetir e transformar sequências musicais aumenta ainda mais a produtividade do utilizador.

Para além disso também conseguimos observar que a integração dos teclados abre portas para situações bastante interessantes, principalmente quando usados em conjunto com as ferramentas de programação dinâmica disponíveis. Um exemplo disso é o caso do nosso teclado de *arpeggios*, onde podemos definir apenas um conjunto de acordes, e depois aplicar uma transformação comum a todos eles para produzirem expressões mais complexas (que podem ser depender de variáveis que vão mudando ao longo da execução).

Para além disso, também concluímos que é importante que a biblioteca *standard* inclua ferramentas genéricas e prontas a utilizar, tais como teclados com as teclas já preenchidas para os casos de uso mais comuns. Isto é útil para facilitar a utilização da linguagem por pessoas que possam sentir-se à vontade com pequenos *scripts* que mudem algumas variáveis e chamem algumas funções, mas não tenham experiência suficiente para criar tudo de raiz.

Por fim, é também algo importante permitir a execução de código (nem que seja apenas de expressões ou instruções singulares, uma de cada vez) em *runtime*. Isto permite ir refinando o programa, principalmente os teclados que possam estar ativos, sem ser necessário terminar a execução do programa. Tal ação, para além de ser mais incomodativo e diminuir a produtividade do utilizador, também apresenta a desvantagem de fazer a aplicação perder a memória, e como tal o estado das variáveis e dos *buffers* que pudessem estar a ser usados.

Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto pode ser dividido de grosso modo em três camadas. Nelas são cobertos um grupo abrangente de aspetos tanto da área do processamento de linguagens e do desenvolvimento de [DSL's](#), da teoria musical, e do processamento digital de audio.

Na camada da linguagem esteve mais proeminente a área de processamento de linguagens, por motivos óbvios. Mas nas decisões tomadas durante o desenvolvimento desta camada, estiveram sempre presentes também as necessidades específicas que a teoria musical (e a sua notação) impõem numa linguagem de programação.

Do mesmo modo, o interpretador faz claramente uso de tópicos do domínio do processamento de linguagens, mas é ainda mais fortemente influenciado pelas restrições e requisitos impostos pela componente musical da linguagem. Esta influencia a forma e a semântica da execução dos vários operadores disponibilizados.

A última camada, de desenvolvimento de uma biblioteca, afeta composta pelos objetos e procedimentos que têm como objetivo facilitar a utilização da linguagem. Para isso foi necessário identificar os casos de utilização mais comuns e prioritários, de modo a guiar a construção destas interfaces para refletirem uma utilização real da linguagem e da aplicação.

5.1 Linguagem

A camada sintática da aplicação pode ser conceptualmente dividida em duas fases:

Sintaxe Esta fase caracteriza-se por delinear qual a sintaxe usada pela linguagem, bem como os construtores e operadores suportados;

Parser Nesta fase foi desenvolvido um *parser* em *Python*, responsável por converter o código fonte da linguagem numa [Abstract Syntax Tree \(AST\)](#);

No entanto, a realidade é que a abordagem seguida (não só nesta camada mas como em todo o projeto) foi mais iterativa, dividindo cada fase em porções semi-independentes e intercalando as várias porções das diversas fases. Esta abordagem tem a vantagem de permitir ir testando e experimentando com o projeto mais cedo do que seria possível com um modelo de desenvolvimento em cascata.

5.1.1 Sintaxe

A sintaxe da linguagem é fortemente inspirada nas usualmente chamadas linguagens da família C, com recurso a parênteses curvos e chavetas para delinear os vários blocos da linguagem. No entanto, as expressões são complementadas com um novo conjunto de literais e operadores dedicados à componente musical da linguagem. Conseguir juntar estes dois mundos traz consigo alguns desafios que serão discutidos mais em detalhe em cada uma das secções seguintes.

5.1.1.1 Literais

Literais referem-se ao conceito de sintaxe desenhada com o propósito de descrever dados (literais) no código. São usados em quase todas as linguagens de programação (e na nossa também) para descrever números, *strings* e booleanos.

A maior diferença nesta área entre a nossa linguagem e as restantes, foi a adição de literais responsáveis por modelar conceitos musicais, como notas, pausas e acordes. Esta sintaxe, tal como já foi mencionado anteriormente, foi inspirada pelo projecto *abc notation*, com algumas modificações.

5.1.1.2 Notas e Pausas

A sintaxe de notas descrição de notas é composta por quatro componentes: **acidentais**, **pitch** (obrigatório), **oitava** e **duração**.

```
1  [_^]*
2  [a-gA-G]
3  [',]*
4  ([0-9]*\\\/)?[0-9]*
```

Listagem 5.1: Expressão Regular que identifica uma nota (quebras de linha adicionadas apenas para clareza de leitura)

O *pitch* refere-se à nota (ou frequência) que deve ser tocada. O **C médio** (também conhecido como C4) é descrito simplesmente como C. É possível descer uma ou mais oitavas acrescentando uma ou mais vírgulas ,. Para subir uma oitava, podemos primeiro substituir as letras maiúsculas por minúsculas. Para subir ainda mais oitavas, podemos acrescentar uma ou mais pelicas '. Para subir ou descer semitons, podemos prefixar as notas com os acidentais ^ e _, respetivamente.

As pausas são mais simples, sendo compostas simplesmente pela letra r seguida da sua **duração** (usando a mesma sintaxe das notas).

5.1.1.3 Acordes

Para definir acordes na linguagem, colocam-se várias notas dentro de parenteses retos. A notação usada para cada nota inclui os seus três primeiros componentes (acidentais, *pitch* e oitava), mas exclui a duração. Em vez de definir a duração em cada nota, esta é definida globalmente no acorde após fechar os parenteses retos.

Por conveniência, para evitar ao utilizador ter de introduzir todas as notas de um acorde manualmente, temos uma sintaxe abreviada para os tipos de acordes mais comuns, onde é apenas necessário introduzir a nota base seguido do tipo de acorde. Esta sintaxe irá suportar mais tipos no futuro, sendo atualmente possível usar os seguintes suffixos:

	Abreviações
Tríades	M, m, aug, dim, +
Quinta	5
Sétimas	m7, M7, dom7, 7, m7b5, dim7, mM7

Tabela 5.1: Lista de abreviaturas possíveis de serem acrescentadas a seguir a uma nota para especificar um acorde.

A decisão de envolver cada acorde com parênteses retos deveu-se ao facto de muitas abreviaturas serem já populares no domínio da notação musical, e como tal o ideal era não as mudar. No entanto, algumas dessas abreviaturas poderiam entrar em conflito com outros componentes da declaração da nota. Por exemplo, C7 poderia ser tanto um acorde de sétima como uma nota com duração de 7. Com a separação por parenteses retos, a ambiguidade deixa de existir, sendo obvio que [C7] é um acorde de sétima, e C7 é uma nota com duração 7.

1 [CFG]/4 [^Fm] [C5]2

Listagem 5.2: Exemplos de três definições de acordes possíveis

5.1.1.4 Modificadores

Para além de permitir descrever notas, também é possível ter modificadores de contexto que permitem alterar certas propriedades das notas e acordes. Duas destas propriedades (duração e oitava) podem ser depois customizadas em cada nota ou acorde, como já vimos. No entanto, em vez de estes valores substituírem simplesmente os valores predefinidos, eles “complementam-se”.

Ou seja, se declararmos por exemplo que a duração base das notas é $\frac{1}{4}$. Quando definirmos alguma nota a seguir com a duração de $\frac{1}{2}$, a sua duração real irá ser calculada da seguinte forma $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$.

Do mesmo modo, quando definimos por exemplo a oitava base como 5 (o valor predefinido é 4), a nota C, passa a representar a oitava $5 - 1 = 4$ (por predefinição seria $4 - 1 = 3$) (nota que aqui estamos a falar de oitavas indexadas a zero. No mundo da música elas são geralmente indexadas a um).

Podemos então ver a lista dos modificadores aceites pela linguagem, bem como exemplos de utilização e os seus respetivos valores predefinidos (usados quando nenhum modificador desse tipo é aplicado).

Nome	Modificador	Exemplo	Predefinição
Instrumento	IN	I46	I0
Velocidade	VN	V100	V127
Tempo	TN	T120	T60
Duração	LN	L2	L1
	L/N	L/4	
	LD/N	L3/8	
Oitava	ON	O2	O4
Compasso	SD/N	S3/4	S4/4

Tabela 5.2: Lista de modificadores e exemplos da sua utilização

5.1.1.5 Variáveis e Funções

Uma das consequências da introdução da sintaxe de notas literais foi a impossibilidade de ter variáveis com certos nomes. Uma variável chamada **a**, por exemplo, iria entrar em conflito com a nota do mesmo nome. Do mesmo modo, uma variável chamada **i1** iria entrar em conflito com o modificador de instrumento.

Em vez de criar casos de excepção para as variáveis que possam ter nomes que conflitam com outros construtores sintáticos, seguimos o exemplo de outras linguagens como *PHP*, *Perl* ou *Powershell*, e decidimos prefixar as nossas variáveis com o carácter **\$**.

No caso das funções foi possível evitar a ambiguidade (e do mesmo modo a obrigatoriedade de as prefixar com um carácter) devido ao facto de as funções terem obrigatoriamente um par de parênteses (sem espaço entre os mesmos e o nome da função) quando são chamadas.

No entanto não quer dizer que as funções passaram imunes à introdução das literais de música. Uma vez que a vírgula é usada para mudar a oitava de uma nota (e foi escolhida de forma a manter compatibilidade com a sintaxe do projeto *abc notation*), existem casos em que esta não pode ser utilizada para separar os argumentos passados a uma função.

Por exemplo, dada a expressão `function_name(C, A, $a, 2)`, quantos argumentos podemos concluir que a mesma tem? Quatro? A resposta correta seria dois, pois as duas primeiras vírgulas poderiam pertencer à nota ou ao separador da função. Mas neste caso a nota teria prioridade na nossa gramática, pelo que `C, A, $a` seria o primeiro argumento, e `2` seria o segundo.

A solução tomada inicialmente foi utilizar ponto-e-vírgula para substituir a vírgula como separador de argumentos nas funções. E enquanto isto resolveu os problemas de ambiguidade, tornou-se óbvio à medida que a linguagem foi avançando, que a prevalência da vírgula como separador de argumentos em quase todas as linguagens de programação mais populares fazia com que houvesse um custo mental de mudança de contexto sempre que alguém mudava de alguma linguagem para a nossa, e vice-versa.

A solução escolhida no final foi um compromisso entre as duas opções: tanto a vírgula como o ponto-e-vírgula podem ser usados como separadores de argumentos, com a exceção de quando o argumento é uma nota musical, onde o ponto-e-vírgula tem de ser obrigatoriamente usado. Assim sendo, poderíamos rescrever o exemplo anterior da seguinte forma `function_name(C; A; $a, 2)`, passando a função a receber agora os quatro argumentos como seria inicialmente esperado.

5.1.2 Gramática

A sintaxe que descrevemos acima foi implementada com recurso ao gerador de *parsers* com base em gramáticas PEG, **Arpeggio** (cujo nome é irónico, tendo o tema desta dissertação).

Aqui vamos analisar brevemente uma versão simplificada da gramática (a versão completa usada pela aplicação pode ser vista em maior detalhe no Apêndice .1). Nesta versão simplificada, incluída para facilitar a leitura, não se preocupa com coisas como por exemplo recursividade à esquerda, ou precedência de operadores. Obviamente, na gramática real foram usadas as técnicas usuais para cobrir esses casos.

5.1.2.1 Corpo

Começamos pela descrição geral do corpo de um ficheiro Musikla. O corpo é composto por uma lista de *statements* (ou instruções) que são obrigatoriamente separados por pontos e vírgula (sendo apenas o último opcional).

No fim de todas as instruções, opcionalmente, o utilizador também pode inserir um bloco de código *Python* (que é denotado pelo prefixo `@python` e consome todo o texto até ao fim).

```
1 main <- body python? EOF
2
3 body <- statement ( ";" statement )* ";"?
4
5 python <- "@python" python_body
6
7 python_body <- ( r".*" r"\r?\n"? )*
```

Listagem 5.3: Produções base da gramática

Ao longo da gramática são também usadas produções triviais, como inteiros, *strings*, booleanos entre outras. Sendo tão comuns e simples, não vale a pena estar a descrevê-las todas. Deixamos no entanto aqui duas produções que vão ser usadas, mas cujas definições podem ser ligeiramente diferentes do usual.

```
1 sep = r"[,;]"
2
3 identifier <- r"[a-zA-Z\_]" r"[a-zA-Z0-9\_\\]"*
```

Listagem 5.4: Produções base da gramática

5.1.2.2 Instruções

```

1 statement <- assignment / voice_declaration / import / for / while / if / return / expression
2
3 import <- "import" identifier
4           / "import" string_value
5
6 assignment <- expression assignment_infix? "=" expression
7
8 assignment_infix <- "+" / "-" / "/" / "*" / "|" / "&"
9
10 voice_declaration <- ":" identifier "=" voice_declaration_body
11
12 voice_declaration_body <- ":" identifier "(" expression ")"
13                        / expression
14
15 for_variables <- variable ( (',' / ';') variable ) *
16
17 for_loop_head <- "for" "(" for_variables "in" value_expression ".." value_expression ")"
18                / "for" "(" for_variables "in" value_expression ")"
19
20 for <- for_loop_head "{" body? "}"
21
22 while <- "while" "(" expression ")" "{" body "}"
23
24 if <- "if" "(" expression ")" "{" body "}" "else" "{" body "}"
25      / "if" "(" expression ")" "{" body "}"
26
27 return_statement <- "return" expression?

```

Listagem 5.5: Produções de instruções na gramática

A nível de instruções, a nossa gramática é bastante banal e não carece de muitos comentários.

5.1.2.3 Expressões

As nossas expressões, como já foi dito, estão aqui listadas. O conceito de recursividade à esquerda é ignorado nestes exemplos por questões de simplicidade, e a precedência de operadores binários é denotada apenas informalmente pela ordem das produções, começando pelo operador com menos precedência e subindo até aos operadores com mais precedência.

Os *arrays* e *objetos* são bastante similares à sintaxe usada no *python*, com a distinção de que para evitarem ambiguidades com outras produções da gramática, têm de ser precedidos com o símbolo @.

Alguns das outras regras (como notas ou teclados, que são aceites como expressões) serão descritas nas próximas sub-secções.

```

1  expression <- expression "|" expression
2      / expression ("and" / "or") expression
3      / expression (">=" / ">" / "==" / "!=" / "<=" / "<") expression
4      / expression ("+" / "-") expression
5      / expression ("*" / "*" / "/" ) expression
6      / expression expression
7      / expression ":" identifier
8      / expression ":" "[" expression "]"
9      / ( expression / identifier ) "(" parameters ")"
10     / "not" expression
11     / "(" expression ")"
12     / "{" body "}"
13     / variable / function_declaration / python_expression
14     / keyboard / note / chord / rest / modifier
15     / integer / none / bool / string / array / object
16
17  variable <- "$" identifier
18
19  parameters <- positional_parameters ( parameters_separator named_parameters )?
20      / named_parameter?
21
22  positional_parameters <- expression ( r"[,;]" expression )*
23
24  named_parameters <- named_parameter ( r"[,;]" named_parameter )*
25
26  named_parameter <- identifier '=' expression
27
28  function_declaration <- "fun" identifier? "(" argument_list? ")" "{" body "}"
29      / "fun" identifier? "(" argument_list? ")" "=>" expression
30
31  argument_list <- argument ( (',' / ';') argument )*
32
33  argument <- ("expr" / "ref" / "in")? "$" identifier ("=" expression)?
34
35  python_expression <- "@py" "{" python_expression_body "}"
36
37  python_expression_body <- r"[^\}]*"
38
39  array <- "@[" "]"
40      / "@[" expression ( sep expression )* "]"
41
42  object <- "@{" "}"
43      / "@{" object_item ( sep object_item )* "}"
44
45  object_item <- object_key _ '=' _ expression

```

```

46
47 object_key <- identifier / float / integer / string

```

Listagem 5.6: Produções de expressões na gramática

5.1.2.4 Música

No que toca a música, a sintaxe tenta seguir ao máximo a notação usada pelo projeto **abc**. As suas particularidades também já foram discutidas em bastante detalhe ao longo deste documento, pelo que as produções colocadas aqui não necessitam de muitos comentários.

```

1  note <- note_pitch note_value?
2
3  note_value <- "/" integer
4              / integer "/" integer
5              / integer
6
7  note_pitch <- note_accidental note_pitch_octave
8
9  note_accidental <- "^" / "^@" / " _ " / " _ " / ""
10
11 note_pitch_octave <- r"[cdefgab]" "'"*
12                  / r"[CDEFGAB]" ", "*
13
14 chord <- "[" note_pitch chord_suffix "]" note_value?
15        / "[" note_pitch+ "]" note_value?
16
17 chord_suffix <- 'm7' / 'M7' / 'dom7' / '7' / 'm7b5' / 'dim7' / 'mM7'
18              / '5'
19              / 'M' / 'm' / 'aug' / 'dim' / '+'
20
21 rest <- "r" note_value?
22
23 modifier
24   <- r"[tT]" integer
25     / r"[vV]" integer
26     / r"[iI]" integer
27     / r"[lL]" note_value
28     / r"[sS]" integer "/" integer
29     / r"[sS]" integer
30     / r"[o0]" integer
31     / ":" identifier

```

Listagem 5.7: Produções de expressões na gramática

5.1.2.5 Teclados

As produções para descrever teclados são um ponto fulcral na nossa gramática e na utilização da nossa linguagem em geral. Nós quisemos que elas permitissem descrever teclados de uma forma consisa, mas ainda assim dando bastante poder ao utilizador na forma como o utiliza.

Com isso em mente, podemos ver que os teclados têm um corpo que difere do corpo geral da linguagem, mas ao mesmo tempo mantém algumas similaridades, nomeadamente, o facto de cada instrução no corpo ser separada por um ponto e vírgula.

No entanto, as instruções no corpo de um teclado são diferentes: a instrução mais básica, denominada por *shortcut*, pode ser imaginada como um par tecla e ação (com mais alguma informação adicional, como por exemplo, argumentos do evento).

Mas para além disso, também há outras instruções aceites que permitem aos nossos teclados serem gerados dinamicamente: *for*, *while* e *if*. Os cabeçalhos destas instruções são de grosso modo iguais aos das suas versões *general-purpose*, mas nos seus corpos aceitam só instruções de teclados também.

Por fim, existe mais uma instrução válida, *block*, que permite colocar instruções normais e sem restrições, envoltas num par de chavetas. Isto é útil quando precisamos de declarar alguma variável dentro do teclado para evitar, por exemplo, repetir um pedaço de código múltiplas vezes.

```

1 keyboard <- "@keyboard" alphanumeric* group? "{" keyboard_body "}"
2
3 keyboard_body <- keyboard_body_statement ( ";" keyboard_body_statement )* ";"?
4
5 keyboard_body_statement <- keyboard_for
6                               / keyboard_while
7                               / keyboard_if
8                               / keyboard_block
9                               / keyboard_shortcut
10
11 keyboard_for <- for_loop_head "{" keyboard_body "}"
12
13 keyboard_while <- "while" "(" expression ")" "{" keyboard_body "}"
14
15 keyboard_if <- "if" "(" expression ")" "{" keyboard_body "}" "else" "{" keyboard_body "}"
16               / "if" "(" expression ")" "{" keyboard_body "}"
17
18 keyboard_block <- "{" body "}"
19
20 keyboard_shortcut <- keyboard_shortcut_key keyboard_argument_list? ":" expression
21
22 keyboard_shortcut_key <- alphanumeric ("+" alphanumeric)* alphanumeric*
23                       / string_value alphanumeric*
24                       / "[" expression "]" alphanumeric*
25
```

```
26 keyboard_argument_list <- "(" ( variable ( r"[,;]" variable )* )? ")"
```

Listagem 5.8: Produções de declaração de teclados na gramática

5.1.3 Parser

Para implementar o parser da linguagem, foi utilizado o módulo *Python Arpeggio*, um módulo que implementa um algoritmo de *parsing* descendente recursivo com recurso a *memoization* para melhorar a *performance*.

```
1  main <- body EOF;
2
3  body <- statement ( ";" statement )* _ ";"? _
4    / ""
5    ;
6
7  // Statements
8  statement <- _ ( var_declaration / voice_declaration / function_declaration /
   ↪ for_loop_statement / while_loop_statement / if_statement / expression ) _;
9
10 var_declaration <- "$" namespaced _ "=" _ expression;
11 // ...
```

Listagem 5.9: Excerto da gramática desenvolvida

A gramática PEG desenvolvida para o projeto foi depois complementada por uma classe **Parser**, responsável por gerar a [AST](#) da linguagem. Para isso recorreremos ao *Visitor Pattern*, com um método para cada regra não-terminal da gramática (todos prefixados com `visit_`).

```
1  def visit_body ( self, node, children ): ...
2
3  def visit_comment ( self, node, children ): ...
4
5  def visit_statement ( self, node, children ): ...
6
7  def visit_var_declaration ( self, node, children ): ...
```

Listagem 5.10: Métodos responsáveis por criarem a AST

5.2 Interpretador

As linguagens compiladas usualmente recorrem à compilação *Ahead Of Time* (AOT), onde o código é transformado em código máquina antes de ser executado (durante a fase de compilação). Esta é a solução que consegue geralmente oferecer melhor *performance*, menor consumo de memória e tempos de *startup* mais rápido. Por outro lado, obriga a um passo de compilação separado sempre que o código fonte é alterado, e regra geral necessita de tipos de dados estáticos para melhor tirar partido das vantagens de *performance*.

No que toca a linguagens interpretadas temos mais opções. Podemos então dividir os seus modos de execução em três categorias distintas, cada uma com possíveis vantagens e desvantagens, bem como diferenças na dificuldade de implementação que são bastante salientes.

Interpretadores Também chamados por vezes como interpretadores *tree walk*, são usualmente os mais simples de implementar (mas também os mais lentos a executar). O seu conceito baseia-se no *design pattern* homónimo, em que as operações da linguagem são modeladas numa árvore, geralmente igual ou similar à estrutura da *AST*. Para executar uma expressão é chamado um método na raiz da árvore, e esse método irá chamar recursivamente os métodos das suas sub-expressões, passando o estado como argumentos da função, e recebendo o resultado pelo valor retornado da função.

Bytecode VM São chamadas máquinas virtuais (VM) porque o seu comportamento assemelha-se mais ao comportamento dos processadores reais dos computadores. As expressões da árvore de sintaxe abstrata são previamente convertidas numa sequência linear de instruções mais simples (geralmente compactadas em binário para melhor *performance*), também referidas como *bytecode*. Cada instrução é depois executada dentro de um ciclo. Esta solução fornece um balanço entre facilidade de implementação e velocidade de execução (evitando a grande quantidade de chamadas recursivas de funções presentes nos interpretadores *tree walk*).

Just In Time O método mais complexo (mas também o que oferece melhor *performance* para tarefas pesadas). O código é executado inicialmente por um dos dois métodos anteriores, de modo a recolher estatísticas sobre qual o tipo de execução mais comum do código. Após esta recolha, é gerado código máquina otimizado para os tipos de dados mais comuns de uma variável, ou para os caminhos de execução mais prevalentes, para que seja possível da próxima vez que o mesmo pedaço de código seja executado, isso ocorra com recurso ao código máquina. Este processo é geralmente repetido ao longo da execução do programa, sendo que caso a versão de código máquina gerada fique desatualizado (o tipo de dados usualmente passados a uma função mudem), essa porção de código seja invalidada e eventualmente substituída por uma nova versão mais adequada.

É possível ver que a solução ideal seria sempre a compilação *Just In Time* (JIT), que evita uma fase de compilação explícita e forçada ao utilizador, mas ao mesmo tempo consegue fornecer *performance*

competitiva para tarefas mais exigentes. No entanto é inevitável concluir que esta solução impõe custos de desenvolvimento astronómicos, e implica equipas de grande dimensão e tempos de desenvolvimento extremamente longos.

Desta forma a nossa escolha reside logicamente entre a solução de **Interpretador** e uma simples **Bytecode VM**. Acabamos por escolher a primeira opção pelas seguintes razões:

- A geração de eventos musicais é relativamente barata em termos computacionais (mesmo admitindo algumas dezenas de eventos musicais por segundo).
- A componente mais pesada geralmente reside na sintetização dos eventos musicais (*note on*, *note off*) em *streams* de audio, mas esta tarefa é encaminhada para bibliotecas mais optimizadas e desenvolvidas em linguagens de baixo nível.
- A possibilidade de correr código *Python* em qualquer parte da nossa linguagem já fornece um bom meio termo para quando é necessária mais alguma *performance* em caminhos de execução críticos (*hot paths*), sem sacrificar demasiado a simplicidade de uma linguagem destinada primariamente a músicos e não engenheiros informáticos.
- Também a facilidade de implementação de um interpretador significou uma velocidade ordens de magnitude superior do que seria possível de outra forma, durante a implementação da linguagem e da prototipação de funcionalidades.
- Uma posterior modificação do interpretador para uma *bytecode VM* mais eficiente seria possível estando a linguagem mais estabilizada, e seria simples manter uma **API** virtualmente 100% compatível.

Em conclusão, cada operação foi implementada através de um método `eval()` em cada classe da **AST**, recebendo uma variável de contexto como *input*, e usando depois o valor retornado pela função como resultado da avaliação da expressão.

5.2.1 Contexto

A variável de contexto guarda o estado da execução, e deve conter toda a informação necessária para cada instrução poder executar. Os seus conteúdos podem ser divididos em três componentes:

Timestamp Esta propriedade é um simples inteiro que permite às expressões de geração de eventos musicais saberem qual o tempo virtual atual. Este tempo virtual é manipulado pelos vários operadores. O operador sequencial por exemplo, que recebe uma lista de expressões e emite uma lista de eventos musicais uns a seguir aos outros, avança este cursor para o fim do último evento antes de passar o contexto para avaliar a expressão seguinte.

Voz Objeto que contém as várias propriedades musicais que devem ser aplicadas durante a geração de eventos, tais como a duração base das notas, o compasso ou as batidas por minuto.

Símbolos Um contentor que permite aceder e modificar os símbolos disponíveis na linguagem (tais como variáveis e funções).

Os contextos foram desenhados com o intuito de serem leves, daí apenas conterem referências para três variáveis. Desta forma é possível criar cópias dos contextos e permitir que operações variadas estejam a executar ao mesmo tempo com diferentes contextos.

Para percebermos a razão desta necessidade, basta pensarmos no operador paralelo. Se colocarmos duas expressões musicais que devem tocar ao mesmo tempo, a geração de uma (ou mais) notas na primeira expressão não deve afetar o *timestamp* da segunda. Para isto, cada uma das expressões deve receber uma cópia do contexto (com o *timestamp* inicial igual). Quando as duas expressões terminarem, no entanto, é importante que o contexto original (que gerou as duas cópias) atualize os seu *timestamp* para qual for a expressão mais longa.

Se prestarmos atenção, podemos estar aqui a detetar um padrão bastante comum na área da programação: o modelo **fork-join**.

E é fácil perceber que faz sentido. Apesar de estarmos a lidar com notas e eventos musicais, fundamentalmente estamos a criar ramos paralelos de execução, e queremos no final aguardar o seu resultado e unificá-lo com o ramo original. Se substituirmos ramo por *thread* para o caso da programação, ou *contexto* para o nosso caso, vemos a equivalência de contextos.

Como tal, para além do estado (as três variáveis) que o objeto de contexto engloba, este providencia também algumas operações bastante simples e úteis:

Fork Cria uma cópia do contexto, podendo receber opcionalmente também um inteiro como argumento com vista a substituir o valor do *timestamp* do contexto pai. Como segundo argumento pode também receber um novo *scope* de símbolos, algo que iremos aprofundar mais no capítulo seguinte.

Join Recebe uma lista de contextos como argumento, e avança o *timestamp* para o maior encontrado nessa lista.

Seek A operação de mudar o *timestamp* do contexto atual.

Os contextos não têm (nem precisam) de referências para outros *contextos-pai* ou *contextos-filhos*, de modo a que não é preciso grandes preocupações relativamente a fugas de memória com a criação de novos contextos: apenas são mantidos em memória os contextos que têm referências para eles, e que portanto estão ainda em uso.

5.2.2 Scope de Símbolos

Cada contexto tem uma referência para o *scope* de símbolos a que tem acesso. Nestes scopes são guardadas as variáveis e funções que o utilizador (e as bibliotecas standard da linguagem) declararem. Mais uma vez, cada objeto de *scope* é composto por três propriedades: uma referência ao seu **antecessor**

(ou pai), uma tabela de *hash* com os **símbolos**, e uma *flag* booleana para designar este *scope* como **opaco**.

O próprio conceito de *scope* implica por si só uma hierarquia, e de facto cada objecto *scope* guarda uma referência para o seu parente (ou para o valor nulo, caso seja o *scope* raiz). Esta propriedade é utilizada para as operações disponíveis, tanto para pesquisar, como para atribuir valores a símbolos do *scope* atual, algo que iremos verificar mais a seguir.

Pesquisa A operação de pesquisa por um símbolo começa por procurar o símbolo no próprio *scope*, e caso não encontre nada, navega recursivamente para o *scope* pai para efetuar a pesquisa.

Atribuição A operação de atribuição segue a mesma filosofia da operação de pesquisa, procurando o *scope* onde o símbolo a atribuir está guardado. No entanto, esta pesquisa decorre até encontrar o primeiro *scope* opaco. Um *scope* opaco não impede a leitura de valores de *scopes* superiores, mas impede a escrita. Por exemplo, uma atribuição dentro de uma função cria apenas uma variável dentro do *scope* dessa função.

Se encontrar o símbolo nalgum *scope*, então muda o seu valor nesse *scope* onde está declarado. Caso contrário, é criado um novo símbolo no *scope* original onde a operação de atribuição foi iniciada.

Enumeração A operação de enumeração permite listar quais os símbolos visíveis a partir de um *scope*. Ela permite listar não só os símbolos do próprio *scope*, mas também dos seus pais, tendo o cuidado para não retornar símbolos que tenham sido obscurecidos por um *scope* mais em baixo. Esta é útil para importar símbolos do *scope* de um módulo para outro, ou para implementar funcionalidades como *autocomplete* sobre um script em execução (e permitir sugerir os símbolos disponíveis).

Apontadores Como vimos na atribuição, é impossível alterar valores de variáveis globais dentro de *scopes* opacos (como dentro de funções, por exemplo). Para colmatar isso, similar ao operador `global` e `nonlocal` do *Python*, é possível instruir um *scope* a criar um apontador para um símbolo declarado noutro *scope*, de forma a que quando ocorre alguma atribuição, a alteração é replicada no seu *scope* original.

5.2.3 Módulos

O interpretador dispõe também da possibilidade de executar código separado em vários ficheiros, cada um sendo considerado um módulo. O utilizador pode configurar uma lista de pastas (num conceito similar à variável de ambiente `$PATH`) onde serão procurados módulos quando alguma instrução `import` é avaliada. Também é possível passar um caminho absoluto ou relativo ao módulo que iniciou a importação.

Cada ficheiro importado é executado apenas uma vez durante a primeira importação, e no final o seu *scope* é guardado em *cache* para ser usado em futuras importações.

Cada instrução de importação é dividida em duas fases: primeiro, o caminho passado é resolvido no caminho real e absoluto do ficheiro. Só depois é verificada na cache se o ficheiro já foi importado antes. Uma vez obtido o seu *scope*, os seus símbolos são enumerados e copiados para o *scope* que efetuou a importação (com símbolos que comecem com um *underscore* sendo tratados como símbolos privados e ignorados).

Para isso, quando o interpretador é inicializado, é criado um *scope* raiz chamado **prelude**, e um *scope* filho. Cada módulo importado é executado num *scope* criado sempre a partir do *prelude*. Desta forma, os símbolos aí guardados estão sempre acessíveis em todos os módulos importados.

5.2.4 Operadores Musicais

A sintaxe suporta os operadores aritméticos e de comparação usuais nas linguagens de programação. De modo geral, a sua sintaxe e semântica na nossa linguagem, o que seria expectável para cada um deles, pelo que não vale enumerá-los a todos nesta secção. No entanto, existem alguns operadores menos convencionais, ou até *overloads* de operadores convencionais (como o operador de multiplicação e adição) que funcionam de forma diferente quando empregues junto a valores do tipo musical. São esses os casos que iremos abordar nas seguintes sub-secções.

Um aspeto importante a ter em conta é que estes operadores não estão restritos gramaticalmente para aceitar apenas expressões musicais, mas aceita sim qualquer tipo de expressão. O seu tipo (e portanto a sua semântica) são apenas decididos em *runtime* (emitando o modo de funcionamento do *overloading* de operadores em *Python*). Isto é necessário porque uma variável pode conter tanto um número como uma expressão musical, e o seu verdadeiro valor apenas é conhecido em execução.

5.2.4.1 Sequencial/Concatenação

Ao longo deste documento já vimos várias instâncias de como declarar uma nota ou um acorde. O ato de concatenar esses eventos (ou seja, reproduzi-los em sequência) é tão fundamental para a linguagem que também é algo que já vimos inúmeras vezes nos exemplos sem pensar muito nisso. Uma das razões para isso deve-se à sua sintaxe (ou falta dela, na verdade). O ato de concatenar eventos musicais é tão simples como escrevê-los uns à frente dos outros, sem nenhum tipo de separador especial (para além dos opcionais espaços em branco). O evento ficam com o seu tempo inicial sempre igual ao tempo final do evento anterior.

```
1 S4/4 T74 L/8 V90;
2 A, E A B ^c B A E D ^F ^c e ^c A3;
```

Listagem 5.11: Excerto da música *Wet Hands* de C418

Também é importante salientar o facto de que as listas de instruções (*statements*) seguem a mesma semântica do operador de concatenação. Cada linha só vai tocar as suas notas quando as linhas anteriores

¹Renderizado com a biblioteca \$ABC_UI, com alguns ajustes manuais feitos para melhorar a clareza.

²Concatenação <https://drive.google.com/open?id=1TP4lcu181s8iMCUFmD3HKnSpeftCzKT0>



Figura 5.1: Pauta musical gerada pela linguagem¹, versão áudio disponível [aqui](#)².

tiverem acabado. Neste exemplo portanto, ter tudo na mesma linha ou separado em duas (ou mais) tem o mesmo resultado, variando apenas a legibilidade.

5.2.4.2 Repetição

O operador de repetição é bastante similar ao operador de concatenação. E faz sentido, uma vez que repetir uma expressão musical N vezes pode ser pensado como um caso particular da concatenação onde existem N operandos, todos iguais, uns em frente aos outros.

```
1 I1 S6/8 T140 L/8 V90;
2 A*11 G F*12
```

Listagem 5.12: Excerto do começo do tema principal de Westworld, por Ramin Djawadi



Figura 5.2: Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível [aqui](#)³.

Este operador, apesar de bastante simples, é também bastante útil para repetir pequenos acompanhamentos (mesmo notas singulares) muitas vezes, ou até para repetir poucas vezes acompanhamentos mais complexos. Evitando repetir os acompanhamentos no código, é possível efetuar alterações em apenas um sítio e ver essas alterações repetirem-se ao longo de toda a estrutura musical.

5.2.4.3 Paralelo

O operador paralelo permite reproduzir múltiplas sequências de eventos musicais em paralelo. Podemos dizer que conceptualmente, o operador paralelo é uma função que recebe uma lista de sequências musicais, e retorna uma única sequência com todas as sequencias combinadas. No entanto é importante que lembrar que o operador tem de respeitar os princípios de **lazyness** (não pedir mais eventos de cada vez do que o que os que são estritamente necessários) e **ordem** (a sequência de eventos resultantes tem de estar estritamente ordenada pelo tempo de início de cada evento).

³Repetição <https://drive.google.com/open?id=1IIm8PQkLsNFMK9MNSVubJSG6SP6KwhPL>

```

1 T120 V70 L1;
2 r/4 ^g/4 ^g/4 ^g/4 ^f/2 e/8 ^d3/8 ^c2 | [^Cm] [BM] [AM] [BM]

```

Listagem 5.13: Excerto da música *Soft to Be Strong* de MarinaFigura 5.3: Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível [aqui](#)⁴.

A implementação do operador paralelo depende de um simples algoritmo de *merge sorted* (não relacionado com o conhecido algoritmo de ordenação de *arrays merge sort* inventado por John von Neumann).

A função *merge sorted* recebe N operandos e cria um *buffer* também de tamanho N . Para cada operando, ela cria um *fork* do seu contexto, para que cada operando possa executar concorrentemente e assim modificar apenas o seu próprio contexto. Depois, ainda durante a inicialização do algoritmo, a função pede a cada operando um evento (que são guardados nas respectivas posições do *buffer*).

Após o *buffer* estar preenchido pela primeira vez com um evento por operando, o algoritmo procura o evento mais recente (o evento com *timestamp* menor) guardado no *buffer*. Vamos assumir que esse evento se encontra guardado na posição K do *buffer*, sendo $k < N$. O método emite esse evento `buffer[K]` para a sequência musical de saída, e de seguida pede ao operando na posição K o seu próximo evento, usando-o para substituir o que estava anteriormente no *buffer* nessa mesma posição (guardando o valor `null` caso o operando K já tenha chegado ao fim). O algoritmo repete depois este passo até todos os operandos terem chegado ao fim.

5.2.4.4 Transposição

As operações `Music + Integer` e `Music - Integer` correspondem à transposição de notas (e acordes). Podem ser aplicados a notas singulares ou expressões musicais complexas, o que resulta na transposição a ser aplicada a cada uma das notas da expressão musical.

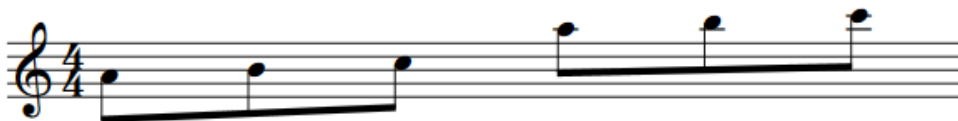
```

1 L/8;
2 (A B c) (A B c) + 12;

```

⁴Paralelo <https://drive.google.com/open?id=1ENTm3hZonYHYQIOgRZ8TQ1Qz-AfRLt2I>

Listagem 5.14: Exemplo de transposição de um acompanhamento com três notas

Figura 5.4: Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível [aqui](#)⁵.

Neste simples exemplo listado em 5.14 e ilustrado em forma de pauta musical na Figura 5.4, podemos ver claramente que a música é composta por dois triplos de notas, ambos com o mesmo padrão, sendo a única diferença que o segundo é tocado uma oitava acima (12 semitons).

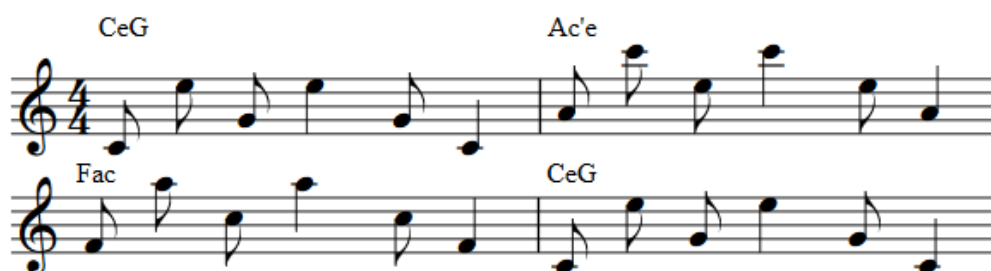
5.2.4.5 Arpeggio

A operação `Chord * Music`⁶ permite aplicar um **Arpeggio**. Esta operação consiste em pegar nas notas presentes no primeiro operador e colocá-las numa lista de $0..N$ não inclusivo (sendo N o número de notas no acorde). De seguida é avaliada a segunda expressão musical, mantendo os seus tempos e posições, mas substituindo as notas pelas pertencentes ao acorde. O modo de substituição usa a seguinte escala: C D E F G A B. Isto é, assume a nota C como base (a que é substituída pela primeira nota do acorde), a nota D sendo substituída pela segunda nota do acorde, e por aí fora.

```

1 S4/4 L/8 T85;
2
3 $p = C D E D2 E C2;
4
5 [CeG]*$p [Ac'e]*$p [Fac]*$p [CeG]*$p;
```

Listagem 5.15: Três acordes diferentes arpegiados com o mesmo padrão

Figura 5.5: Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível [aqui](#)⁷.

No exemplo da listagem 5.15 recorreremos ao uso de uma variável para guardar o padrão da nossa melodia. De seguida usamos o operador de *arpeggio* em cada um dos acordes, sempre com o mesmo

⁵Transposição https://drive.google.com/file/d/1xVey6on6Q-sWjNgo__Llb3Qg0F1-_axa

⁶Na implementação atual, o operador aceita não só acordes como primeiro operando, mas qualquer expressão musical

⁷Arpeggio <https://drive.google.com/file/d/1E6ayR6gG2CfsikWFHijnEIui@rR1cAL7>

padrão. Esta funcionalidade permite definir uma melodia e testar rapidamente múltiplas variações da mesma sem ter de alterar manualmente a melodia de cada vez.

Atualmente a definição do padrão recorre à sintaxe das músicas usuais, por conveniência. No futuro, seria interessante implementar uma sintaxe específica para a definição de *arpeggios*, usando por exemplo numeração romana. Dessa forma, o padrão do exemplo na listagem 5.15 ficaria algo como I II III II2 III I2. Outra possibilidade seria a de usar a numeração decimal, com alguma marcação para distinguir dos números inteiros, tal como 1º 2º 3º 2º2 3º 1º2.

5.2.4.6 Redimensionamento

O operador de **Redimensionamento**, denotado pela sintaxe `Music ** Integer`, `Music ** Fraction`, ou `Music ** Music`, pode talvez ser o menos intuitivo, mas é algo bastante útil. Ele permite mudar o tamanho de uma expressão arbitrária já declarada, para combinar com outra duração expressa num inteiro, fração, ou inferida através da duração de uma segunda expressão musical. O seu valor de retorno é então o primeiro operando, mas com os tempos proporcionalmente esticados (ou encolhidos) de modo a, no total, ficarem com a nova duração escolhida.

```

1 S2/4 L/8 T90;
2
3 $chords = V90 [CeG] [Ac'e] [Fac] [CeG];
4 $melody = CGde2gc2 CGdr5;
5
6 $chords ** $melody | $melody;
```

Listagem 5.16: Redimensionamento da duração de uma expressão musical

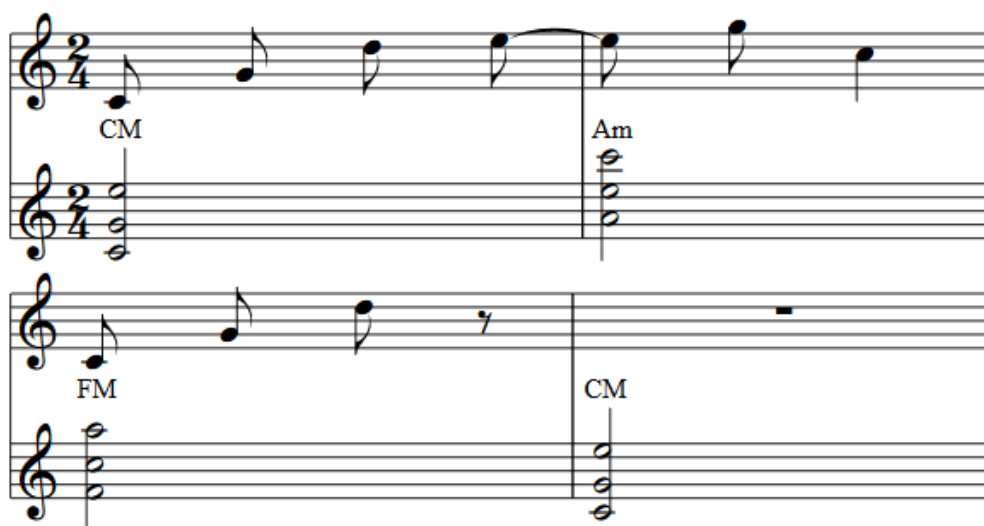


Figura 5.6: Pauta musical gerada pela linguagem, versão áudio disponível [aqui](#)⁸.

⁸Redimensionamento <https://drive.google.com/file/d/1aVVXGDVQEAmHl-jadSnZ60qIGmgqhgxR>

No exemplo presente na listagem 5.16, temos duas variáveis com durações diferentes. A primeira, **\$chords**, tem a duração total de $\frac{1}{2}$ ($4 \times \frac{1}{8}$). Por sua vez, a segunda variável, **\$melody**, tem a duração de **2** ($16 \times \frac{1}{8}$). As duas durações podiam ser ajustadas manualmente (bastando multiplicar a duração de cada acorde por 4), mas isso implicava que qualquer mudança na melodia exigia recalcular as proporções manualmente. E também nem todas as situações apresentam contas tão simples como $2 \div \frac{1}{2}$. Deste modo, os cálculos são feitos automaticamente pela aplicação e estão sempre atualizadas.

5.3 Biblioteca Standard

5.3.1 Inputs & Outputs

Durante a execução, os eventos musicais são representados em memória por objetos *Python* que derivam da classe base **MusicEvent**, e estão agrupados em sequências pelos objetos que derivam da classe **Music**.

A forma mais óbvia de criar estes objetos é utilizando a syntaxe de literais de música inspirada pelo projeto *abc notation* que pode ser utilizada dentro da própria linguagem.

No entanto, não há nenhuma restrição que force este a ser o único método de introdução ou geração de eventos musicais. De facto, existem já vários formatos de descrição de música, e a capacidade de os poder ler e traduzir para objetos musicais dentro da nossa linguagem, indistinguíveis daqueles que são criados pela syntaxe de literais, traz inúmeras vantagens e abre a possibilidade de este projeto se tornar como um canivete suíço da notação musical, capaz de ler, transformar e depois também escrever em diversos formatos diferentes.

Para além de ser capaz de ler (**input**) eventos musicais e transforma-los nos objetos em memória que a nossa linguagem expecta, é também importante poder, depois de os criar e transformar ao nosso gosto, poder fazer algo de útil com eles. Ou seja, escrever (**output**) estes eventos musicais em diversos formatos.

O verdadeiro objetivo da linguagem é que seja extensível, de modo a que qualquer pessoa capaz de programar *Python* possa conectar um novo *input* ou *output* para as suas necessidades específicas, sem necessitar de ter conhecimentos intrínsecos do funcionamento de toda a linguagem. Nesta secção iremos descrever alguns dos modos de *input* e *output* incluídos de base com a linguagem e que servem de prova de conceito do que é possível fazer com ela.

Os *outputs* podem ser globais, ou seja, aplicarem-se aos eventos emitidos pela aplicação. Neste caso são geralmente passados como argumentos de linha de comandos, ou adicionados durante a execução através da função `$script::player::add_sequencer()`. Também é possível gravar apenas expressões de música específicas com a função `save()`.

5.3.1.1 FluidSynth

Esta biblioteca serve apenas como **output** para a linguagem, e permite sintetizar sons a partir de ficheiros *SoundFont*. Os sons gerados podem depois ser passados diretamente para as colunas do computador, ou guardados em disco num ficheiro de música.

Para implementar este *output*, utilizamos o projeto *pyfluidsynth*[23] para interoperar o nosso código *Python* com a biblioteca *FluidSynth*, escrita em *C*. Como os *bindings* do projeto em *Python* não cobriam toda a *API* da biblioteca que nós necessitávamos, optamos por realizar um *fork* dos *bindings*, o que nos permitiu depois efetuar as alterações necessárias à nossa medida.

O objeto principal disponibilizado pelo *FluidSynth* é o objeto *Synth*. Este disponibiliza inúmeros métodos (baseados no *standard MIDI*) para ativar e desativar uma nota, mudar o instrumento, definir o valor de um controlo, entre muitas outras. Os métodos chamados neste objetos são aplicados imediatamente, pelo que se tivermos uma lista de ações (eventos musicais) a tomar com *timestamps* variados, temos de tratar do seu correto agendamento.

Felizmente a biblioteca também providencia um objeto para isso: *Sequencer*. Para o efeito registamos um *callback* na nossa aplicação que recebe o evento e é responsável por o aplicar ao *Synth*. Depois, sempre que algum evento é gerado, chamamos a função *Sequencer.timer()* e passamos-lhe o *timestamp* em que deve ser executado o evento, bem como o evento em si e o *callback* a chamar quando o temporizador concluir. Uma das vantagens é o facto de o *FluidSynth* já disponibilizar uma interface segura de acesso entre *threads*[henningsson2011fluidsynth].

A maioria dos eventos da nossa linguagem são inspirados pelo *standard MIDI*, tal como a é desenhada a *API* do sintetizador do *FluidSynth*, pelo que aplicação dos eventos passa geralmente apenas por chamar a função correta e fornecer-lhe os parâmetros carregados pelo evento. Há no entanto uma exceção à regra, algo que iremos aprofundar mais à frente, e que é a possibilidade de reproduzir, para além de notas musicais, mas ficheiros musicais também. Infelizmente o *FluidSynth* não suporta diretamente este tipo de utilização, mas com alguma criatividade foi possível implementá-la usando as ferramentas que nos eram disponibilizadas.

A sintetização de notas efetuada pelo *FluidSynth* recorre aos ficheiros *Soundfont*, que podem ser descritos de uma forma muito simplista como um dicionário que associa a cada nota de cada instrumento um *buffer* contendo o som a ser reproduzido, mais algumas configurações que permitem ajustar o som gerado a diversas situações (duração da nota, velocidade, entre outras).

Estas fontes de som podem ser carregadas para o *FluidSynth* e através do método *Synth.sfload()* e passando-lhe o caminho do ficheiro. Mas para além de fontes carregadas do disco, também é disponibilizada uma estrutura *RamSFont* que permite criar, representar e editar uma fonte de som completamente em memória, que pode ser depois associada ao sintetizador pelo método *Synth.add_sfont()*.

Sempre que algum evento musical traz consigo um ficheiro de música para ser reproduzido, nós associamos o conteúdo desse ficheiro a uma nota de um instrumento virtual da *RamSFont* que criamos.

Quando o mesmo ficheiro é pedido para ser reproduzido várias vezes, a mesma nota do mesmo instrumento é utilizada, evitando estar sempre a ler os conteúdos do ficheiro. Este evento musical é depois convertido num evento de reprodução de notas, com a informação da nota e do instrumento a usar sendo preenchidas automaticamente com o nosso instrumento virtual.

Desta forma, podemos reproduzir ficheiros arbitrários de som em conjunto com as notas musicais de uma forma transparente para o utilizador.

No entanto, um obstáculo que encontramos durante a implementação desta funcionalidade foi o facto de os sons associados a notas com um valor inteiro inferior a 15 (cada instrumento pode ter 128 notas, entre 0-127) tinham o seu *pitch* distorcido, mesmo quando eram passadas as *flags* para que os sons fossem reproduzidos sem ajustamento do *pitch*. Este comportamento no entanto desaparecia acima de notas com o valor 15, pelo que adotamos esse valor como a nossa base (o que desperdiça 15 lugares em cada instrumento que poderiam ser associados a sons). Como na *SoundFont* podemos utilizar também vários instrumentos, isso significava que ainda assim conseguíamos reproduzir $127 \times 113 = 14351$ sons distintos, o que é bastante mais do que suficiente para a maioria dos casos.

5.3.1.2 MIDI

Mais uma biblioteca que achamos importante incluir de base foi o suporte para leitura e escrita de dados MIDI. Isto tanto pelo facto de que o *standard* MIDI é um dos mais utilizados no mundo da música, mas também porque a nossa implementação da linguagem, particularmente relativa à representação dos eventos musicais em memória, foi fortemente inspirada por este formato. Dessa forma, implementar funções de transformação dos não exigiu demasiado esforço. Para o efeito, utilizamos o módulo *Python* *mido*, que permite ler e escrever eventos MIDI, tanto de portas como de ficheiros em disco.

A nível de leitura (**input**), o módulo disponibiliza uma função `readmidi()` que permite ler eventos musicais de um ficheiro ou porta MIDI, retornando um objeto do tipo **Music**. A função aceita os seguintes parâmetros (sendo os parâmetros de ficheiro ou de porta mutualmente exclusivos):

file (*Opcional*) Quando presente, lê os eventos musicais de um ficheiro MIDI.

port (*Opcional*) Permite ler os eventos de uma porta em vez de um ficheiro. Este parâmetro aceita vários valores.

True Se receber este valor, tenta listar as portas MIDI disponíveis e escolher a mais indicada para ler os eventos.

List[String] Uma lista de nomes de portas para escutar. Os eventos das portas referidas são combinados numa única sequência de eventos, como se viessem todos da mesma porta.

String O nome de uma única porta para estar à escuta de eventos.

voices (*Opcional*) Uma lista de vozes para mapear a cada canal MIDI a que os eventos pertencem. Quando nenhuma voz é especificada, a voz atual presente no contexto é utilizada para todos os canais.

cutoff_sequence (*Opcional*) Uma sequência de notas ou eventos musicais que, quando recebidos pelas portas MIDI, são utilizados como sinal para terminar imediatamente a leitura e retornar a sequência de eventos já capturada. É ignorada quando a fonte de leitura é um ficheiro.

ignore_message_types (*Opcional*) Uma lista de *strings* com os nomes de mensagens MIDI que devem ser ignoradas.

É também possível escrever (**output**) para portas e ficheiros MIDI de forma bastante simples. Este *output* é ativado automaticamente quando se grava um ficheiro com a extensão MIDI, ou quando se prefixa o nome de uma porta com a *string* `midi://`.

Ao escrever para ficheiros ou portas MIDI, é possível filtrar apenas os eventos de certas vozes, e mapear também os canais atribuídos a cada voz. Isto é extremamente útil para permitir ligar a aplicação a programas *DAW*, e permitir receber os eventos MIDI em faixas separadas (para aplicar efeitos ou transformações específicas a cada faixa).

5.3.1.3 ABC

Outro dos formatos de saída suportados é o formato **abc notation**. A sintaxe das notas e acordes da nossa linguagem é fortemente inspirada nesta notação, pelo que não seria estranho pensar que escrever para este formato não seria nada de especial. E em parte é verdade, na medida que gerar o texto com o formato certo não é complicado.

A maior diferença é, no entanto, o facto de que o formato *abc* é estático, e a sua estrutura foi desenhada para imitar de certa forma a notação das partituras musicais. Tudo isto envolve conceitos como agrupar as notas por vozes, pautas, compassos, claves, entre outros. De certa maneira, o modelo de dados que a linguagem usa para representar as notas em memória mapeia-se de forma muito mais simples para o formato *MIDI* do que para o *abc*.

Para colmatar este facto, os eventos, antes de serem convertidos para o formato *abc*, são introduzidos numa *pipeline* que executa uma série de passos de modo a tornar a conversão mais simples. De grosso modo, os passos pela ordem que são executados, são os seguintes:

- Em primeiro lugar o sistema tenta converter quaisquer notas que possam estar a ser emitidas como eventos *on/off* separados. Isto acontece quando, por exemplo, o teclado é usado, o que pode implicar começar a tocar as notas sem saber quando o utilizador as vai parar. Os pares de eventos são então convertidos num só evento com a informação do início e da duração da nota.
- Em segundo lugar, o sistema tenta identificar as notas paralelas que possam estar a ser emitidas e que possam pertencer a um acorde. Isto acontece mais uma vez quando, ao invés de usar a sintaxe de acordes presente na linguagem, o usa o teclado para gerar o acorde através de notas/teclas diferentes ativadas ao mesmo tempo.

- Em terceiro lugar, as notas que pertencam à mesma voz mas que tenham *overlap* na sua duração, são colocadas em linhas diferentes. Mais uma vez, isto acontece mais frequentemente quando o teclado é usado, onde o utilizador pode estar a tocar notas concurrentemente da forma que quiser.
- Em quarto lugar, são inferidos eventos pausa quando duas notas consecutivas pertencentes à mesma voz têm um intervalo. Mais uma vez, isto acontece mais frequentemente quando o utilizador toca com o teclado. Mas neste caso pode também acontecer quando as notas são declaradas pela sintaxe da linguagem, como por exemplo na seguinte situação $A \ (\ B \ | \ C \)$, onde as notas A e B ficam na mesma pauta. A nota C, no entanto, como se sobrepõe com a nota B, pelo passo anterior, seria movida para a sua pauta. No entanto, esta pauta não teria nada ao início, e por isso precisa de uma pausa. Seria conceptualmente equivalente ao resultado de $(A \ B) \ | \ (r \ C)$.
- Finalmente em quinto lugar, são introduzidos eventos especiais na sequência musical para identificar, para cada voz em separado, quando devem ser introduzidos novos compassos, ou novas pautas na partitura. Do mesmo modo, isto implica que notas e acordes cuja duração não caiba num compasso, sejam divididos quantas vezes forem necessários, e conectados através de [ligaduras](#).

Estas transformações são reutilizáveis (não estão fortemente acopladas ao formato *abc*) e são implementadas utilizando o conceito de transformadores, que iremos abordar mais à frente neste documento.

Muitas destas transformações são, no entanto, imperfeitas por natureza: a deteção de acordes a partir de notas paralelas individuais, por exemplo, nunca pode ter 100% de certeza se as notas que agrupou são realmente um acorde. É possível que o músico tivesse a intenção de que as várias notas pertencessem a vozes diferentes, por exemplo.

Para além disto, a notação musical é tão complexa que apenas uma pequena parte é suportada pela nossa linguagem. Deste modo, é preciso ter em mente que apesar de a linguagem ser capaz de gerar ficheiros *abc* válidos, e com a sua estrutura maioritariamente correta de acordo com o que o utilizador tivesse em mente, serão muitas vezes necessários pequenos ajustes manuais para personalizar os resultados aos gostos de cada um. Ainda assim, o facto de não ser necessário escrever o ficheiro todo manualmente é por si só uma vantagem enorme.

Isto porque o ficheiro *abc* não serve só como um formato de texto. Existem várias ferramentas para o converter para outros formatos, como *PDF*. Por exemplo, o projeto **\$ABC_UI**⁹ é utilizado pela nossa linguagem para, em conjunto com o exportador *abc*, gerar páginas [HTML](#) com uma renderização da pauta usando [Scalable Vector Graphics](#) (SVG).

Desta forma, podemos concluir que o formato *abc* serve como uma espécie de ponte *standard*, e nos permite apanhar boleia para depois suportar inúmeros outros formatos que existam muito mais facilmente.

⁹http://dev.music.free.fr/web-demo/\protect\TU\textdollarABC_UI.html

5.3.2 Ficheiros de Som

Como já foi mencionado no sub-capítulo sobre o *output* **FluidSynth**, uma das funcionalidades que queríamos implementar na linguagem era a possibilidade de reproduzir ficheiros de som arbitrários, e integra-los com o resto da geração de eventos musicais.

Isto abre a possibilidade de incluir nos projetos que usem a linguagem sons gerados por outros programas, e mais uma vez vai de encontro ao nosso objetivo central de extensibilidade da linguagem. Podemos pensar assim que mesmo que a aplicação não suporte todo o tipo de geração de sons que alguma pessoa possa precisar, é sempre possível usar a aplicação para a maioria dos casos mais comuns que são suportados, e gerar ficheiros com recurso a alguma aplicação externa que colmatem as nossas necessidades mais específicas. Para utilizar-mos esta funcionalidade, temos à nossa disposição o método `sample()`.

```
1 A B sample( "cihat.wav" );
```

Listagem 5.17: Exemplo de reproduzir um ficheiro a seguir a duas notas

Para facilitar todo o processo, os ficheiros de som devem seguir todos as mesmas especificações. Por conveniência, adoptamos as configurações suportadas pela biblioteca *FluidSynth* para blocos de som nas suas *SoundFonts*.

Configuração	Valor
Formato	WAVE
Sample Rate	41.100hz
Canais	2
Bit depth	16bit
Compressão	N/A

Tabela 5.3: Formato nativo suportado pelo FluidSynth

Para facilitar a utilização, é possível ao utilizador carregar ficheiros de som em formatos diferentes desde que tenha a ferramenta FFMPEG instalada no sistema. Quando isso ocorre, a linguagem converte o ficheiro musical *background*, aplicando as configurações necessárias, e guarda-o depois em memória. Isto é especialmente útil para experiências rápidas e com ficheiros pequenos (até alguns *megabytes*).

Esta funcionalidade traz bastante simplicidade à utilização da linguagem, mas impõe um custo durante a inicialização de todos os programas. Para permitir aos utilizadores determinarem se os seus ficheiros vão necessitar de conversão, sem terem de recorrer a ferramentas externas para efetuar a verificação, disponibilizamos a função `is_sample_optimized()`, em conjunto com a função `optimize_sample()` para converter o ficheiro e gravar o resultado em disco.

```
1 if ( not is_sample_optimized( "cihat.wav" ) ) {
2   # Converts the file and saves it to disc
3   optimize_sample( "cihat.wav", "cihat_opt.wav" );
4 };
```

Listagem 5.18: Verificar se um ficheiro de audio está otimizado, e convertê-lo caso contrário

Desta forma a conversão ocorre apenas uma vez, e de seguida o utilizador pode utilizar o ficheiro convertido e não se preocupar com a perda de performance sempre que usa o som num *script*.

5.3.3 Grelhas

A linguagem tem dois modos de produção de música principais: expressões musicais descritas no código, e a utilização de teclados em tempo real. Em termos de propriedades temporais, de modo geral, as expressões musicais são geradas com tempos precisos. Por outro lado, como é natural, músicas criadas através dos teclados musicais vão ter tempos imperfeitos. Quando utilizadas de modo separado, as diferenças muitas vezes são tão subtis que não se notam. Mas quando queremos tocar uma expressão de música pré-definida em código ao mesmo tempo que se utiliza um teclado, as diferenças e imperfeições podem-se tornar mais óbvias[[doi:10.1177/1029864913486793](https://doi.org/10.1177/1029864913486793)].

A operação conhecida como Quantization¹⁰ é possível na nossa linguagem através da utilização de **Grelhas**. Uma vez que o objetivo das grelhas é poderem ser utilizadas em tempo real à medida que as notas vão sendo tocadas, a forma de funcionamento escolhido para as grelhas é bastante simples e determinística, dependendo apenas do tempo (*timestamp*) e tipo do evento que queremos alinhar.

Uma grelha é composta por um número infinito de células, todas do mesmo tamanho, que se estendem ao longo do eixo temporal. Quando um evento musical é tocado, esse evento vai calhar algures dentro de uma dessas células. A responsabilidade da grelha passa por determinar se o evento deve ser movido no tempo, bem como para onde deve ser movido. Para isso, devemos compreender como cada célula da grelha é dividida.

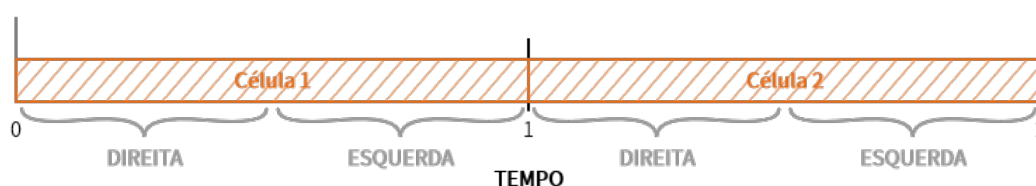


Figura 5.7: Representação de duas células de uma grelha

Na figura 5.7 podemos ver representadas duas células de uma grelha, cada uma com tamanho de 1 segundo. Também podemos ver que cada célula está dividida em duas partes, direita e esquerda, e a ordem dessas partes pode parecer engano, ou que estão trocadas. Mas estão corretas, pois na verdade cada uma dessas partes é relativa não à célula, mas ao separador das células.

Olhemos por exemplo para o divisor central, situado em cima da marca do 1 segundo. A parte à sua esquerda refere-se à esquerda do separador, e a parte à direita referem-se à direita do separador. Desta forma, faz mais sentido a ordem das partes.

¹⁰[https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_\(music\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_(music))

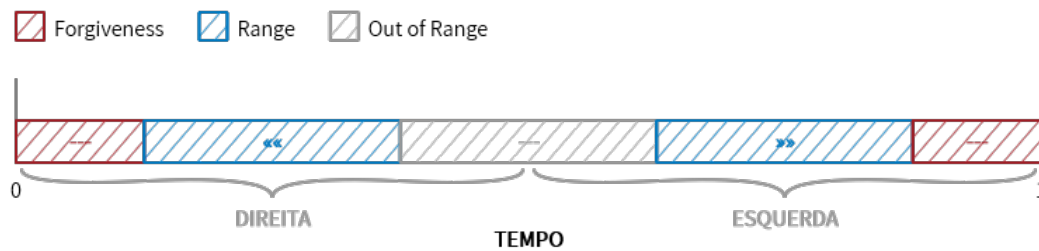


Figura 5.8: As várias áreas configuráveis de uma grelha

Por predefinição, ambas as partes têm o tamanho igual a metade do tamanho da célula (ou seja, neste caso, tanto a parte da esquerda e da direita têm o tamanho de 0.5 segundos). No entanto, é possível customizar o tamanho das duas de forma igual, ou cada uma em particular, através das propriedades **forgiveness** e **range**.

```

1 $grid = Grid( 1,
2   forgiveness = 125, # 1/8 of a second
3   range = 375 # 3/8 of a second
4 );

```

Listagem 5.19: Código de definição da grelha representada na figura 5.8

Não nos esqueçamos que o objetivo da grelha é alinhar eventos, movendo os eventos ao longo do eixo do tempo para junto dos separadores das células. A propriedade *range* tem como valor predefinido metade do tamanho da célula. Isso significa que tanto o **range_left** como o **range_right** cobrem de modos igual toda a célula, e dessa os eventos são movidos para o separador da grelha que estiver mais próximo. O valor predefinido da propriedade *forgiveness*, por outro lado, é zero, o que significa que mesmo os eventos que se encontrem já muito perto dos separadores são movidos.

Na listagem 5.19 podemos ver a definição de uma grelha simétrica (as propriedades *left* e *right* são iguais). O valor de *forgiveness* implica que eventos que estejam a mais de 372 milissegundos de distância de qualquer um dos separadores são ignorados pela grelha, isto é, o seu tempo não se mexe. O valor de *forgiveness*, o que significa que eventos que estejam a menos de 125 milissegundos de um dos separadores são também ignorados pela grelha. Neste exemplo, são apenas movidos os eventos que estejam entre 125 e 375 milissegundos de distância de um dos separadores.

Note-se que cada propriedade poderia ser customizada para a esquerda e para a direita. Isto é, o exemplo a cima podia ser reescrito da seguinte forma:

```

1 $grid = Grid( 1,
2   forgiveness_left = 125, # 1/8 of a second
3   forgiveness_right = 125, # 1/8 of a second
4   range_left = 375, # 3/8 of a second
5   range_right = 375 # 3/8 of a second
6 );

```

Listagem 5.20: Código alternativo de definição da grelha representada na figura 5.8, com as propriedades *left* e *right*

Se passarmos das propriedades de configuração para a grelha resultante, na verdade cada célula passa a ter dois **effective ranges**, duas áreas (uma para a esquerda e outra para a direita) onde os eventos que aí calharem são movidos. Os eventos fora dessas áreas são ignorados.

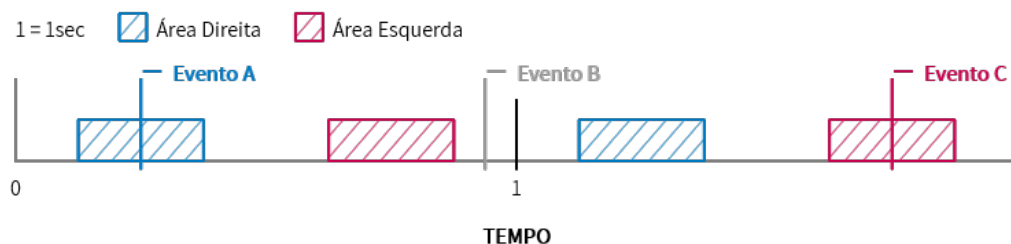


Figura 5.9: Áreas em que a grelha irá mover os eventos, e qual o separador a que pertencem.

Tomemos como exemplo a seguinte situação com três eventos e a grelha definida anteriormente: o evento A, como calha dentro da área azul (devido à propriedade **range_right**), vai ser relocado para o tempo zero. O evento B no entanto, como não calha em nenhuma área (devido a propriedade **forgiveness_left**). Finalmente, o evento C como calha na área vermelha (devido à propriedade **range_left**) é relocado para o tempo 2.

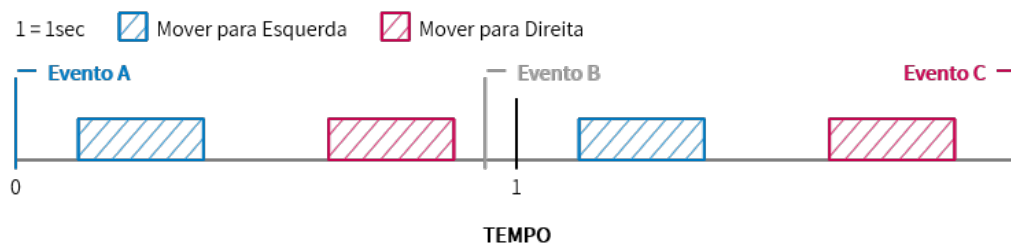


Figura 5.10: Posição dos eventos após o alinhamento com a grelha ter sido aplicado.

O modo de funcionamento das grelhas pode parecer à primeira vista um desnecessariamente complexo, ou os exemplos um pouco artificiais, mas o objetivo foi sempre permitir ao utilizador aplicar o tipo de grelha que mais se adequar ao seu caso. Isso pode ser uma simples grelha onde só define o tamanho de cada célula, e os *ranges* são cada metade de cada célula, empurrando todos os eventos para o separador que lhe esteja mais próximo, ou exemplos de grelhas assimétricas, onde possivelmente os eventos são sempre movidos só numa direção (esquerda ou direita) ou onde eventos que estejam perto dos separadores não sejam movidos.

5.3.4 Teclados Musicais

Para além de permitir construir expressões que geram sequências de eventos musicais dinâmicas, algo que esteve desde início no topo da nossa lista de prioridades foi sem dúvida adicionar suporte para a

criação de teclados interativos. Sendo esta linguagem desenvolvida em computadores, não seria errado pensar que por teclado nos referimos aos teclados físicos dos computadores. E esses fazem certamente parte, mas quando nos referimos a teclados musicais, referimo-nos à possibilidade de descrever na nossa linguagem mapeamentos entre *eventos* e expressões musicais ou ações a executar quando esses eventos acontecem.

```

1 @keyboard {
2   a: print( "Tecla a carregada" );
3   b: d;
4 };

```

Listagem 5.21: Exemplo de declaração de duas teclas

Esses eventos podem então ser teclas de um teclado, mas também de um piano conectado ao computador, ou eventos do rato, ou de qualquer outro dispositivo de I/O que as pessoas queiram adaptar, bastando para isso herdar a classe `KeyboardEvent`.

5.3.4.1 Tipos de Eventos

Os tipos de evento mais comum são teclas de teclado e de piano. Por essa mesma razão implementamos açúcar sintático na definição desses eventos (que são implementados pelas classes `KeyStroke` e `PianoKey`, respectivamente).

```

1 @keyboard {
2   ctrl+c: ^c;
3   [16]: d;
4   [c']: e;
5 };

```

Listagem 5.22: Declaração de três eventos, o primeiro é uma combinação de teclas, o segundo referência o *virtual key code*, e o terceiro uma nota MIDI

A lista de tipos de eventos suportados de base pela linguagem são os seguintes:

KeyStroke Este tipo de eventos referem-se às teclas do teclado. Para além de permitirem descrever teclas singulares, também suportam os modificadores *ctrl*, *alt* e *shift*. O evento não carrega consigo nenhum parâmetro extra.

Parâmetros: *N/A*

PianoKey Sinalizam quando uma nota é tocada e recebida pela porta MIDI que a aplicação esteja à escuta. Trazem consigo um parâmetro que identifica a velocidade com que a nota foi premida.

Parâmetros: *\$vel*

MouseClicked Evento ocorre quando algum dos botões do rato é premido. As informações sobre a posição em que o rato se encontra, bem como qual o botão premido e se foi premido ou levantado, são incluídas como parâmetros deste evento.

Parâmetros: \$x, \$y, \$button \$pressed

MouseMove Evento ocorre sempre que o rato é movido. Pode ser útil para controlar alguma variável como se fosse um *slider*. Trás como parâmetros as coordenadas do rato.

Parâmetros: \$x, \$y

MouseScroll Evento despoletado quando a roda do rato é acionada. Para além de trazer informações sobre a posição do rato, indica também qual o valor que a roda se moveu, tanto na vertical (mais comum) como também na horizontal.

Parâmetros: \$x, \$y, \$dx, \$dy

Os **parâmetros** são algo que, como pudemos ver, é disponibilizado por quase todos os tipos de eventos. Eles dão-nos a possibilidade de saber que os eventos foram despoletados, mas saber propriedades sobre o que os despoletou. Estes parâmetros podem ser acedidos passando as variáveis desejadas com o nome do parâmetro (a ordem é irrelevante) à frente da declaração do evento. Essas variáveis podem depois ser acedidas dentro da ação do evento.

```
1 @keyboard {
2     [keyboard\MouseMove] ($x, $y): print( $x, $y );
3 };
```

Listagem 5.23: Teclado que imprime as coordenadas do rato sempre que ele se move

Para criar novos tipos de eventos, basta criar uma nova classe em *Python* que derive da classe `KeyboardEvent`. Esta classe deve implementar apenas dois métodos obrigatórios (`__hash__` e `__eq__`) que são usados para guardar os eventos num dicionário, ficando cada evento associado à sua ação. Opcionalmente pode ser definido um terceiro método, `get_parameters`, que deve retornar um dicionário com as variáveis e os seus respetivos valores que o evento disponibiliza. Cada tipo de evento pode também definir uma propriedade chamada `binary` como verdadeira ou falsa.

Os **binários** referem-se ao conceito de eventos que são conceptualmente compostos por duas fases: premir e soltar. Exemplos deste tipo de eventos são, obviamente premir e soltar teclas do computador ou de um piano. A razão porque este conceito é tratado como um caso particular na nossa linguagem, ao invés de serem tratados como dois eventos separados (`PianoKeyPress` e `PianoKeyRelease` por exemplo), deve-se ao facto de os eventos binários mapearem de forma bastante elegante com o conceito de *note on* e *note off* na geração de música. E da mesma maneira que a nossa linguagem não obriga o utilizador a declarar por cada nota o seu ponto de início e de fim separados, não faria sentido fazer isso para os teclados.

Por essa razão, os teclados podem (através dos modificadores `hold` `extend` que vamos cobrir a seguir) mapear automaticamente o início e o fim das notas declaradas em cada uma das suas teclas, com os modos *press* e *release* dos seus eventos.

5.3.4.2 Modificadores de Eventos

Cada evento de um teclado tem associada uma ação: essa ação pode ter *size effects*, e opcionalmente retornar um evento musical (ou uma sequência de eventos). Sempre que o evento é despoletado, a ação é avaliada e caso retorne um objeto musical, esse é reproduzido.

Por predefinição, o tempo que a tecla está premida não afeta a duração das notas emitidas. Pelo contrário, a duração das notas (e acordes e todo o resto de eventos musicais) é calculada com o que o utilizador tiver determinado no código. Isto acontece porque o teclado permite que o utilizador defina não só um evento musical para cada tecla, mas sim que possa definir uma música completa, se quiser. Neste caso quando a tecla é premida, a música começa a tocar até terminar.

Os **modificadores** permitem customizar o comportamento do teclado quando encontra alguma sequência musical. Cada modificador pode ser aplicado a todo o teclado (quando aparece à frente da *keyword* `@keyboard`), ou ser aplicada individualmente a cada tecla.

repeat Quando presente, o teclado reproduz a música da tecla, e quando esta acabar, começa a tocar novamente, sem parar.

toggle Reproduz a música da tecla até esta ser premida novamente (ou a música acabar).

hold Reproduz a música da tecla enquanto a tecla estiver premida (ou a música acabar).

extend Tanto o `toggle` como o `hold` permitem terminar uma música mais cedo. Com este modificador, todas as notas tocadas pela tecla ficam ativas enquanto a pessoa não carregar novamente na tecla (em conjunto com o `toggle`), ou a largar (em conjunto com o `hold`).

Assim, se quisermos replicar o comportamento de um piano, por exemplo, em que premir a tecla começa a tocar uma nota, e libertá-la para a nota, podemos usar os modificadores `hold` `extend` em conjunto.

```

1 @keyboard hold extend {
2   a: c;
3   s: d;
4   d: e;
5 };

```

Listagem 5.24: Aplicar o modificar `hold` `extend` a um teclado inteiro

5.3.4.3 Estruturas de Controlo

Até agora temos visto como é possível declarar manualmente ações num teclado. Algo que ainda não foi dito é o facto de o bloco de declaração de um teclado `@keyboard { }` ser uma macro que, antes da execução, é traduzida para instruções que criam o teclado e registam as teclas.

```

1 {
2   $__keyboard = keyboard\create();
3   keyboard\push_flags($__keyboard; 'hold'; 'extend');
4   keyboard\register($__keyboard; 'a'; c);
5   keyboard\register($__keyboard; 's'; d);
6   keyboard\register($__keyboard; 'd'; e);
7   keyboard\pop_flags($__keyboard; 'hold'; 'extend');
8   $__keyboard
9 }
```

Listagem 5.25: Código gerado automaticamente para criação do teclado descrito no capítulo anterior

Vendo desta forma é possível concluir que o código fica extremamente mais verboso, mas ao mesmo tempo abre novas possibilidades: é possível registar teclas condicionalmente, envolvendo a chamada da função num `if`, ou registar teclas em massa dentro de um ciclo `for` ou `while`.

A abordagem de criar os teclados manualmente desta forma é sem dúvida válida para os casos mais complexos (com alguns dos teclados definidos na biblioteca *standard* a serem criados desta forma). Mas achamos que seria interessante poder integrar este tipo de estruturas de controlo simples com a sintaxe específica de declaração de teclados, para permitir mais variedade ao tipo de teclados que são possíveis de criar com ela.

Assim sendo, dentro da expressão de declaração de teclados, são suportados os seguintes construtores sintáticos:

Condicionais Permitem tornar a declaração de uma ou mais teclas condicionais. O código gerado é transformado de forma a envolver as funções que registam as teclas dentro de um `if`.

Ciclos É possível ter também ciclos `for` e `while` dentro de um teclado. Isto permite percorrer um *array* ou repetir a mesma tecla com alguma variação várias vezes.

Blocos É possível envolver instruções da linguagem em chavetas em qualquer parte dos teclados.

Tomemos um pequeno exemplo que associa a quatro teclas a ação de imprimir para o ecrã um número. Podemos ver que é possível encadear os construtores uns dentro dos outros (neste caso um `if` dentro de um `for`). Mas mais interessante do que isso, é verificarmos que existe um pequeno bloco de código responsável por declarar a variável `$ki = $i`, e que no `print` são impressos as duas variáveis.

```

1 $i = 0;
2
3 @keyboard {
```

```

4   for ($k in @[ 'a', 's', 'd', 'f' ]) {
5       if ($i > 0) {
6           { $ki = $i };
7           [$k] hold extend: print( $i, $ki );
8       };
9       { $i += 1 };
10  }
11 };

```

Listagem 5.26: Declaração de teclado dinâmica recorrendo ao uso de ciclos, condicionais e blocos de código.

Não seria invulgar pensar que ambos os números seriam iguais sempre que fossem impressos, mas isso não é o caso. Isto providencia uma boa ocasião para reforçar a noção que as teclas ficam associadas a expressões, e essas expressões são executadas só quando a tecla é ativada.

Isto significa que quando qualquer tecla for premida, o valor de `$i` será sempre o mesmo: 4. Isto porque a variável está declarada fora do teclado, e mais importante, fora do ciclo `for`, o que significa que todas as teclas referenciam a mesma variável. Por outro lado, a variável `$ki` é declarada pela primeira vez dentro do ciclo, e como tal está a criar quatro símbolos diferentes que são depois cada um referenciado pela tecla respetiva.

5.3.4.4 Gravar e Reproduzir Performances

Uma vez criado um ou mais teclados, o som produzidos por eles é direcionado automaticamente para os *outputs* (por predefinição as colunas de som). No entanto, é possível instruir os teclados para guardarem num ficheiro de *performance* uma lista das teclas ativadas. Isto permite depois ao utilizador reproduzir uma performance gravada, ou até efetuar modificações a essa gravação.

```

1 keyboard\record( $file );

```

Listagem 5.27: Gravação de uma *performance*

Através da função descrita na listagem 5.27, é possível instruir os teclados para gravarem para um determinado ficheiro, cujo caminho é passado como argumento. Também é possível passar o valor `none` para a função, o que efetivamente termina a gravação da performance atual (se estiver a decorrer alguma). De notar que uma vez que os teclados suportam registar como ações, não só expressões musicais, mas também quaisquer blocos de códigos válidos, podemos chamar esta função na ação de uma das teclas do teclado. Desta forma é possível iniciar e parar a gravação durante a execução do programa.

```

1 keyboard\replay( $file, $delay = 0 );

```

Listagem 5.28: Reprodução de uma *performance*

Da mesma maneira que é possível gravar uma *performance*, é possível também reproduzir uma *performance* a qualquer momento através da função referenciada em 5.28. Neste caso devemos passar o

caminho do ficheiro contendo a *performance* gravada, bem como um parâmetro opcional (em milissegundos) para atrasar o início da reprodução durante algum tempo. Isto pode ser útil se quisermos tocar alguma faixa ao vivo por cima da gravação, para alinhar a mesma ou para servir de tempo de preparação.

```
1 $music = keyboard\readperf( $file, $keyboards = [] );
```

Listagem 5.29: Conversão de uma *performance* numa sequência de eventos musicais

Mas podemos não querer reproduzir diretamente uma *performance*. Também é possível carregar uma *performance* gravada para memória, como uma sequência de eventos musicais convencional, que podemos depois manipular com todas as funções e operadores que já vimos e que operam sobre música.

Esta função aceita também, para além do usual caminho do ficheiro de *performance*, uma lista opcional de teclados a usar na conversão. Quando a lista vai vazia, são utilizados todos os teclados ativos. Isto demonstra uma das funcionalidades mais interessantes da gravação de ficheiros de *performance*, na medida que permitem gravar os eventos das teclas ativadas, mas podemos depois reproduzir essas *performances* com teclados com notas e expressões diferentes associadas às teclas.

5.3.4.5 Buffers

Ao contrário de *performances*, que gravam os eventos que acionam as teclas dos teclados, é possível guardar diretamente os eventos musicais produzidos pelos teclados com a class `keyboard\Buffer`. Os eventos capturados em *buffers* podem ser tratados como qualquer outra sequência musical, e como tal, ser composta com outras expressões, passada a funções e tudo o resto que a linguagem possibilita.

```
1 $buffer = keyboard\Buffer( $keyboards = ..., $start = true );
```

Listagem 5.30: Instanciação de um *buffer*

Ao construir um *buffer*, por predefinição, todos os teclados são gravados imediatamente. É no entanto possível passar uma lista a limitar quais os teclados que irão ser gravados para o buffer, útil para permitir dividir as notas gravadas em faixas separadas (um *buffer* grava uma faixa, outro grava uma faixa diferente, etc). Para além disso, é possível também não iniciar a gravação para o buffer imediatamente.

Entre as funcionalidades disponibilizadas pela classe, podemos destacar as mais importantes como sendo:

start Começa a gravar os eventos emitidos. Mesmo depois de chamado o método `start()`, o *buffer* só inicia a gravação quando for capturado o primeiro evento musical. Caso se queira forçar um *padding* silencioso ao início, pode-se emitir um evento de pausa com duração zero. Caso o buffer já tenha conteúdos em memória, o que for gravado agora é acrescentado ao fim.

stop Para a gravação do *buffer*. Mais uma vez, a gravação é cortada no último evento musical. Caso se queira forçar a duração do *buffer* com mais algum tempo depois da última nota, basta emitir um evento de pausa com duração zero quando realmente quisermos que o *buffer* termine.

clear Limpa tudo o que o buffer tiver gravado e permite reutilizar o *buffer* do início.

to_music Retorna os conteúdos do *buffer* na forma de uma sequência musical. Esta sequência é imutável: alterações aos conteúdos do *buffer* não são refletidos nos dados da sequência gerada. Para obter essas alterações, este método deve ser chamado novamente, retornando uma nova sequência musical.

from_music Permite substituir manualmente o conteúdo do *buffer* com uma sequência musical. É útil como iremos ver mais à frente para permitir as operações de `save()` e `load()` dos *buffers*.

Tudo isto permite manipular os *buffers* através da linguagem de *scripting*, mas sendo o objetivo dos *buffers* serem usados em conjunto com os teclados, primariamente quando o utilizador os estiver a usar para compor arranjos musicais, é desejável associar todas estas chamadas de código a teclas do teclado, para as permitir usar durante a sua utilização.

Tendo acesso às funções dos *buffers*, cada utilizador pode então programar a sua utilização como bem quiser. Mas para os casos mais comuns, a biblioteca da linguagem fornece já funções destinadas a facilitar o seu uso.

```
1 keyboard\bufslot( $bf = keyboard\Buffer( start = false ), $key = "p" );
2
3 keyboard\bufpad( ref $buffers, $keys = @[ '0', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9' ],
  ↳ $savename = "buffers.mkl", $load_key = 'f7', $save_key = 'f8' );
```

Listagem 5.31: Funções disponibilizadas para criação de *buffers* controlados por teclados.

A primeira função `keyboard\bufslot` permite criar apenas um *buffer* associado a uma tecla.

A segunda `keyboard\bufpad` função permite uma utilização mais avançada, associando *N buffers* distintos a *N* teclas. Para além de permitir iniciar e parar de gravar, bem como reproduzir os conteúdos de cada *buffer*, também permitem gravar e carregar os conteúdos dos *buffers*.

Quando o utilizador pressiona a tecla para gravar ou carregar os *buffers*, é mostrado ao utilizador uma *dialog* para escolher o caminho onde guardar. O caminho introduzido pelo utilizador fica guardado em memória e é preenchido automaticamente da próxima vez que a *dialog* for mostrada, evitando obrigar o utilizador a escrever o caminho de todas as vezes.

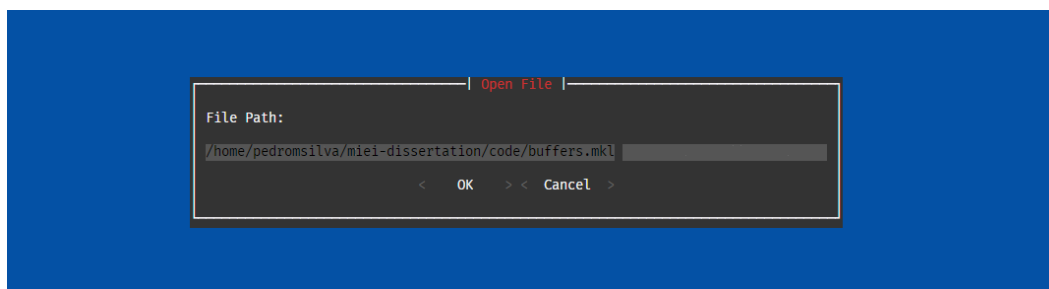


Figura 5.11: Janela de carregamento dos buffers

Os conteúdos do *buffer* são guardados num ficheiro `.mkl`, o que é bastante interessante pois permite evitar ter de criar e implementar algum formato específico para guardar os seus conteúdos. Mas também permite, sendo um formato de texto, e sendo a sua sintaxe a da nossa linguagem *Musikla*, o utilizador pode gravar os *buffers*, abrir o ficheiro com algum editor de texto e efetuar alterações manualmente, e carregar essas alterações de novo para os *buffers* com extrema facilidade.

```
1 $buffers = @{};
2 $buffers::set(1; (:default r2/23 [B^d^f]1/29 r1/32 [A^ce]1/32))
```

Listagem 5.32: Formato do ficheiro de gravação dos *buffers*.

O formato do ficheiro passa pela declaração de uma variável **\$buffers** contendo um dicionário. O dicionário contém depois um par chave-valor para cada *buffer* não vazio aquando da gravação do ficheiro. A chave representa o índice do *buffer*, e o valor representa a sequência musical lá guardada nesse momento.

Para guardar o ficheiro, é criada a memória a sua *AST* respetiva. Esta é depois convertida em texto através da classe `CodePrinter`.

O processo de carregar o ficheiro é igualmente simples, passando por executar o *script* num contexto isolado. Depois o valor da variável `$buffers` é obtido, e as entradas do dicionário são percorridas, substituindo os valores presentes nos *buffers* recorrendo à função `keyboard\Buffer.from_music()`.

5.3.5 Editor Embutido

O modo principal de execução de código baseia-se em carregar um ficheiro *Musikla* e executá-lo. Mas ao mesmo tempo, uma das funcionalidades mais importantes da linguagem é permitir descrever teclados musicais que permitem interação do utilizador enquanto a aplicação não for fechada.

No entanto, muitas das funcionalidades disponibilizadas pela aplicação são acessíveis através de classes e funções que podem ser chamadas pela linguagem. Isto tipicamente envolve uma de duas opções: o utilizador ter de mudar o ficheiro de código e executá-lo novamente, o que implica perder os dados que estejam em memória (como *buffers* e o possível estado do teclado). Também é possível associar pedaços de código a ações do teclado para permitir chamar esses pedaços de código durante a execução do programa, mas isso implica ser necessário planear todos os possíveis casos de uso à partida antes de iniciar executar o teclado. Se nos esquecermos de alguma, temos de voltar à opção inicial de mudar o código fonte e reiniciar a aplicação.

A solução passa pela inclusão de um simples editor de texto em *runtime* (implementado com recurso ao módulo `Python prompt_toolkit`). A biblioteca dispõe de uma função para permitir abrir e fechar o editor de texto ao premir uma tecla, ou também uma função para abrir diretamente o editor quando é chamada, dando assim ao utilizador mais controlo sobre como é possível usar este editor.

```
1 keyboard\repl( $key = "\\", $ctx = none );
```

Listagem 5.33: Abre o editor quando a tecla `\` é premida

Na listagem 5.33 é possível ver a função que permite abrir o editor embutido. É também possível passar um contexto através do qual as expressões do editor irão ser avaliadas. Isto pode afetar quais as variáveis que são visíveis, ou até ter vários editores para diferentes contextos.

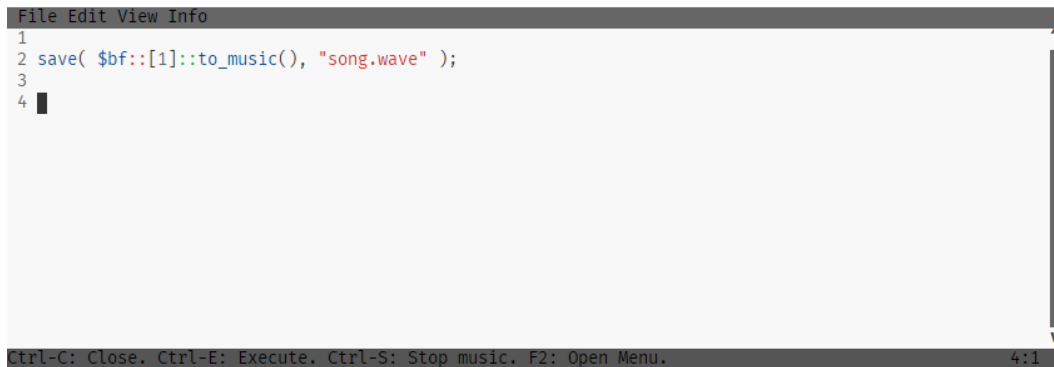


Figura 5.12: Interface do editor embutido.

```
1 keyboard\open_repl( $cb = none );
```

Listagem 5.34: Abrir manualmente o editor

Se não quisermos que o editor seja aberto simplesmente quando uma tecla é carregada, podemos chamar manualmente a função para o abrir. Isto tem a vantagem de podermos passar um *callback* ao editor para sermos notificados quando o editor é fechado. Isto significa que o editor pode ser usado não só como um ambiente de programação *Musikla* genérico, mas também como um modo de *input* de texto genérico a ser usado pelo utilizador.

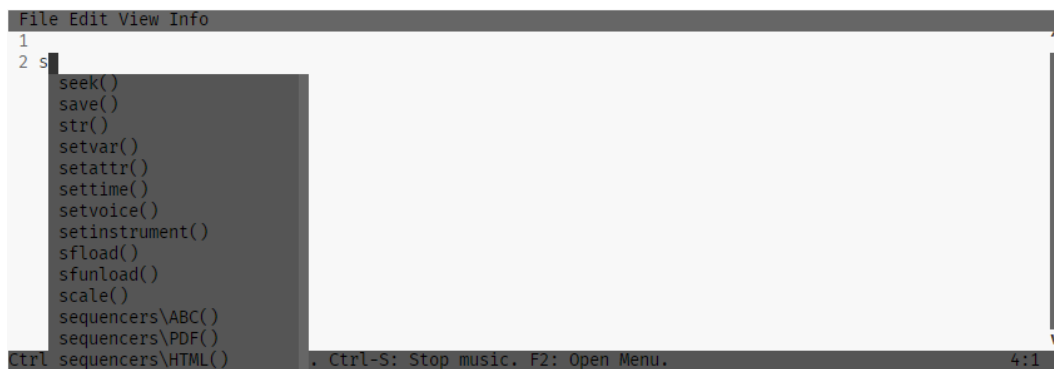


Figura 5.13: Implementação básica de uma solução de *auto-complete*.

Como prova de conceito, também foi incorporado um sistema de *auto-complete* que sugere símbolos que estejam declarados no nível base do contexto. Devido ao facto de o editor estar a correr ao mesmo tempo que a aplicação, esta funcionalidade não foi implementada através da análise dos ficheiros de código. Em vez disso, o objeto de contexto é analisado em tempo real para listar quais os símbolos que estão acessíveis.

Esta funcionalidade é extremamente útil tendo em conta que a linguagem tem como público alvo músicos que podem não ser programadores experientes. Por isso mesmo, ter um ambiente que assista o utilizador a saber quais as variáveis e métodos que pode utilizar.

No futuro, era interessante melhorar o *auto-complete* para completar sub-propriedades de objetos e listas, bem como mostrar informações adicionais sobre as sugestões, tal como os seus tipos e no caso de serem métodos, quais os parâmetros que aceita.

5.3.6 Transformadores

Os transformadores são uma solução para um problema prático que surgiu durante o desenvolvimento do projeto, ao invés de serem uma funcionalidade pública da linguagem. No entanto a razão pela qual foram necessários, bem como a solução desenvolvida, podem ser interessantes de serem discutidas. Para compreendermos melhor a razão da sua necessidade, imaginemos o seguinte caso.

5.3.6.1 O Problema

Um dos tipos de dados mais importantes na nossa linguagem é o tipo *música*, que como já referimos várias vezes pode ser representado como uma sequência de eventos musicais. Quando pensamos em sequências, é fácil imaginar uma variedade de operações genéricas possíveis de serem aplicadas nelas, como *map* e *filter*.

Mas também existem operações mais específicas ao nosso caso que podemos querer aplicar, como dada uma sequência de eventos, separar os *NoteEvent* em dois *NoteOnEvent* e *NoteOffEvent*. Isto à primeira vista pode parecer um simples *flatMap*, em que alguns eventos são transformados em dois a serem inseridos na sequência. No entanto, uma vez que os eventos nas nossas sequências devem viajar sempre ordenados, não podemos simplesmente inserir o evento *off* junto do *on*, porque podem existir outros eventos que comecem ao mesmo tempo ou depois da nossa nota começar, mas antes dela acabar.

Nesse caso basta construirmos um algoritmo simples que guarde num *buffer* ordenado os eventos *off*, e os vá inserido imediatamente atrás do primeiro evento com um *timestamp* maior que os seus.

E como este, existem vários algoritmos que podem ser usados e reutilizados em diversas partes da aplicação com os mais diversos propósitos de transformar sequências de eventos.

O problema surge quando a fonte da música pode ser síncrona (no caso de uma expressão da nossa linguagem) ou assíncrona (no caso de um teclado ou piano, em que os eventos vão sendo gerados em tempo real). *Python* suporta assincronismo através do módulo *asyncio* que pode ser usado em conjunto com a sintaxe *async/await*.

Para simplificar os exemplos seguintes, tomemos o caso da operação genérica *map*. As suas implementações, nas variantes síncrona e assíncrona, poderiam ser descritas como visto na listagem 5.36.

```
1 def map (fn):
2     for event in music:
```

```

3     yield fn(event)
4
5  async def map_async (fn):
6      async for event in music:
7          yield fn(event)

```

Listagem 5.35: Exemplo de uma função map com versões síncronas e assíncronas

Como podemos ver, quando a única diferença no algoritmo é se a **fonte é síncrona ou assíncrona**, a variação é mínima. Mas a diferença é sintática, por isso teríamos duas escolhas:

- Para cada algoritmo criar duas versões, uma síncrona e outra assíncrona. Mas isto levava a duplicação de código particularmente má, porque o que iria mudar eram apenas **duas palavras** em todas as funções.
- Usar sempre a versão assíncrona, mesmo quando a fonte dos dados é síncrona. Isto porque é sempre possível converter uma sequência de dados síncrona em assíncrona, mas o inverso já não é. O problema desta solução é o facto de as funções assíncronas terem *cor*¹¹, e só poderem ser chamadas por funções da mesma cor. Qualquer função que potencialmente lidasse com expressões musicais teria de passar a ser assíncrona. E como a nossa linguagem é dinamicamente tipada, potencialmente qualquer expressão pode retornar uma sequência musical, logo **todas as expressões** na nossa linguagem teriam de ser executadas em modo assíncrono, o que traria uma penalização a nível de *performance* difícil de justificar.

5.3.6.2 A Solução Escolhida

A solução passou por criar uma abstração a que chamamos **Transformador**, que contém um bocado das duas opções anteriores: Os algoritmos são declarados apenas uma vez, e são depois envoltos num *transformador* que disponibiliza duas interfaces públicas, uma síncrona e outra assíncrona. Cada transformador tem uma interface pública composta por 4 funções que permitem simular um iterador: `add_input(ev)`, `end_input()`, `add_output(ev)` e `end_output()`.

Para evitar chamar manualmente as funções e tratar do controlo do fluxo de execução manualmente, são incluídos dois métodos de classe em todos os transformadores que permitem correr um iterador (síncrono ou assíncrono). As funções, chamadas `iter` e `aiter` recebem (e retornam) respetivamente um iterador síncrono e assíncrono.

Vejamos agora um exemplo do transformador **map** na listagem 5.36. Pode parecer bastante mais verbosa do que as funções *map* iniciais, mas é importante notar que este custo é fixo: só esta parte do algoritmo muda, e todo o resto seria igual. Como os transformadores utilizados no projeto são bem mais complexos do que este pequeno exemplo (podendo ter mais de uma centena de linhas de código), este custo fixo de escrever cerca de seis linhas de código *boilerplate* por transformador não é um problema tão grande.

¹¹<https://journal.stuffwithstuff.com/2015/02/01/what-color-is-your-function/>

```

1 class MapTransformer(Transformer):
2     def __init__(self, fn):
3         self.fn = fn
4
5     def transform ( self ):
6         while True:
7             done, value = yield
8
9             if done: break
10
11         self.add_output( self.fn( value ) )

```

Listagem 5.36: Implementação da função map usando a nossa abordagem de transformadores

Todos os transformadores implementam uma função gerador *transform*, que é a peça central de tudo isto. Aí dentro, temos um ciclo responsável por emular a iteração sobre a sequência de *input*. Depois utilizamos a instrução *yield* para obter o próximo valor. Aqui estamos a aproveitar o facto de esta instrução não permitir apenas enviar valores para fora do gerador (que é o seu uso mais comum), mas também receber valores. Desta forma o gerador fica em pausa até receber o próximo evento. A vantagem desta pausa é que pode ser retomada logo de seguida se estivermos a trabalhar com iteradores síncronos, ou pode ficar assim até o próximo valor ficar disponível, no caso de um iterador assíncrono.

```

1 # Irá imprimir 0, 2, 4, 6, 8
2 for ev in MapTransformer.iter( range( 5 ), lambda e: e * 2 ):
3     print( ev )

```

Listagem 5.37: Exemplo de um transformador map e da sua utilização

Na listagem 5.37 podemos ver a utilização do transformador aplicada a uma lista (já que também implementam a interface de um iterador). O método `aiter` poderia ser usado de forma análoga com um *async for* e com um iterador assíncrono.

Manual de Utilização

O resultado final do processo de desenho e desenvolvimento descrito a cima foi um módulo *Python* publicado no repositório *PyPi* chamado *musikla*. Este módulo pode ser usado através da linha de comandos, ou os seus sub-módulos podem ser usados diretamente num projeto *Python*.

Nesta secção vamos fazer uma pequena *overview* dos diversos modos de como o módulo pode ser utilizado (versão da documentação mais completa disponível em na [web](#)).

A instalação é bastante simples, sendo suficiente correr o comando seguinte comando:

```
1 pip install musikla
```

Listagem 6.1: Processo de instalação do *package* *musikla*

É importante notar que uma dependência central da linguagem é a biblioteca nativa *FluidSynth*. Apesar de existir uam versão 2.x, essa não é suportada, pelo que é necessário o utilizador certeficar-se que o seu sistema tem a versão 1.x instalada.

6.1 Módulos

O projeto *musikla* está dividido em bastantes sub-módulos, os mais importantes dos quais são listados aqui:

musikla.core.theory Contém classes e funções auxiliares relativas à teoria musical, utilizadas por diversos outros sub-módulos.

musikla.core.events.transformers Alberga os transformadores responsáveis por separar notas musicais em eventos On/Off, por exemplo, ou por tentar agrupar notas concorrentes em acordes, se for o caso disso, entre muitos mais.

musikla.core.events Contém as classes que representam os eventos musicais em memória, desde os mais óbvios, como o `NoteEvent`, `ChordEvent` ou `RestEvent`, mas também outros menos óbvios como o `ControlChangeEvent`, por exemplo.

musikla.core Disponibiliza muitas das classes mais fundamentais para o funcionamento da linguagem, tais como `Context`, `Music`, `Instrument`, `Voice`, `SymbolsScope`, entre outros.

musikla.parser.abstract_syntax_tree Contém as classes que representam os diversos nós da [AST](#).

musikla.parser Disponibiliza as classes `Parser`, responsáveis por criar uma [AST](#) com base numa *string* ou num ficheiro contendo código Musikla, bem como a classe `CodePrinter` responsável pelo processo oposto, transformando de volta uma [AST](#) numa *string* usando a sintaxe da linguagem.

musikla.audio.sequencers Alberga os diversos sequenciadores (formatos de saída) suportados nativamente pela linguagem.

musikla.audio Contém as classes `Player` e `InteractivePlayer` que permitem reproduzir sequências musicais para os sequenciadores.

musikla.libraries Disponibilizam as várias classes que definem as funções e símbolos expostos para a linguagem Musikla pela biblioteca *standard*.

musikla O módulo principal, contém as duas classes responsáveis por inicializar todos os sistemas necessários para a linguagem funcionar, `CliApplication` e `Script`.

6.2 Configuração

Quando a aplicação é inicializada, é opcionalmente carregado um ficheiro `musikla.ini` se este se encontrar na pasta *Home* do computador do utilizador. Este ficheiro permite configurar diversos dos valores por predefinição utilizados pela linguagem. A maioria destas propriedades pode ser substituída e customizada em cada execução quando a linguagem é executada pelo terminal.

```

1  [Musikla]
2  soundfont = /path/to/soundfont.sf2
3  output = -o alsa
4  midi_input = midi input port name
5  path = colon : separated list of paths to search for when importing files
6  prelude = colon : separated list of paths to include in the prelude (what is available to all
   ↪ modules)
7  autoload = colon : separated list of paths to execute before the main file does
8
9  [FluidSynth.Settings]
10 audio.periods = 2
11 audio.period-size = 64

```

```
12 synth.sample-rate = 44100
```

Listagem 6.2: Exemplo de um ficheiro de configuração da linguagem

O valor da propriedade **soundfont** indica o caminho do ficheiro `.sf2` a usar pela linguagem para sintetizar os sons.

A propriedade **output** permite indicar qual ou quais os sequenciadores (e os seus parâmetros) a serem por predefinição utilizados quando o utilizador não especifica nenhum em particular. A sua sintaxe é explicada em mais detalhe no capítulo seguinte.

A propriedade **midi_input** permite indicar o nome da porta *MIDI* a usar quando algum teclado está à escuta de eventos *MIDI*.

A propriedade **path** permite listar um conjunto de caminhos que serão procurados sempre que o utilizador importe algum ficheiro global nos seus *scripts*.

A propriedade **prelude** indica uma lista de *scripts* Musikla a serem executados e carregados, e cujos símbolos exportados devem ficar disponíveis para todos os outros módulos.

A propriedade **autoload** é similar à *prelude*, mas os símbolos apenas são disponibilizados para o ficheiro que o utilizador estiver a correr diretamente (o ficheiro *entry point*, podemos dizer).

Na secção **FluidSynth.Settings** podemos alterar manualmente as propriedades passadas ao sequenciador *FluidSynth*. A lista de propriedades e valores suportados está disponível [aqui](#)¹.

6.3 Linha de Comandos

A linha de comandos pode ser executada através do comando `musikla`. Podemos executar um ficheiro passando o seu caminho como argumento. Também podemos correr `musikla -help` para vermos uma listagem dos argumentos suportados.

```
1 musikla file.mkl --soundfont custom_soundfont.sf2
2   -o alsa --gain 1
3   -o music.wav
4   -o musikla_port -f midi --port
```

Listagem 6.3: Exemplo de um ficheiro de configuração da linguagem

O comando pode ter uma lista de seuquenciadores (ou *outputs*) para utilizar. Estes devem vir sempre no fim do comando, depois de todos os argumentos e opções globais, e são identificados pela opção `-o` ou `-output`. O tipo do sequenciador é geralmente inferido pelo valor passado ao output, mas caso haja ambiguidade, é possível identificar manualmente o formato com a opção `-f out -format`. Também são passadas a esse *output* todas as opções que estiverem depois do `-o` e até ao fim do comando, ou até ao próximo `-o` encontrado. As opções aceites variam com o formato do *output*.

¹FluidSettings.xml <http://www.fluidsynth.org/api/fluidsettings.xml>

Conclusão

O desenvolvimento do projeto envolve vários aspetos, desde o desenho da sintaxe e da gramática correspondente, até à geração de sons a serem guardados em ficheiros ou reproduzidos imediatamente em dispositivos áudio. Também engloba aspetos comuns em todas as linguagens de programação, em conjunto com questões mais específicas sobre como gerir o conceito de tempo na linguagem, de *laziness* para gerar apenas as notas necessárias, entre muitos outros.

Mas para além disso também abrange quais as ferramentas e as metodologias que são mais adequadas para a utilização da linguagem. É necessário para isso estudar com exemplos reais, qual a melhor forma de produzir e desenvolver música em formato textual. Quais as funções e as suas interfaces que são mais úteis disponibilizar logo à partida a todos os utilizadores.

No entanto, sendo a criação musical uma área tão ampla, é inútil tentar sequer conseguir desenvolver uma ferramenta que cubra todos os cantos e sirva todas as necessidades dos seus potenciais utilizadores. É por isso que é importante apoiar o desenvolvimento do projeto nas vantagens que a linguagem *Python* fornece, quer a nível da sua facilidade de uso, popularidade, e fácil extensão sem necessidade de complicados processos de compilação.

O projeto deve ser por isso desenvolvido com extensibilidade em mente, tendo como objetivo principal servir como uma fundação estável capaz de ligar as diversas ferramentas existentes, não só na área da música, mas permitir ligar a música a outras áreas.

Durante o desenvolvimento, tornou-se claro que criar música através de programação é uma forma extremamente poderosa de se trabalhar em muitas situações, mas não é uma solução perfeita para todos os casos. Com isto em mente, sentimos que a nossa escolha de incluir diretamente na nossa linguagem a possibilidade de programar teclados permite cobrir os momentos em que o utilizador precisa de uma forma mais interativa e imediata de tocar e compôr músicas. Para além disso, as funcionalidades extra de permitir gravar e reproduzir as *performances* em *buffers* enquanto os teclados estão ativos, bem como a inclusão de um simples editor de código que permite escrever e executar código em *runtime* ofereceram

uma experiência de composição e experimentação com ágil e rápido feedback loop.

A nível de processamento de linguagem, sentimos que a escolha de usar um interpretador *tree-walk* favoreceu muito a prototipagem de funcionalidades na linguagem. Mas fica sempre aberta a possibilidade de implementação da linguagem com um *backend* alternativo, quer através de uma máquina virtual de *bytecode*, ou possivelmente até *convertendo* o código Musikla para código *Python* e usando as funcionalidades de execução em *runtime* do mesmo.

A coleção de métodos e classes disponibilizados pela linguagem, e mais especificamente, pela biblioteca *standard* desenvolvida para acompanhar a linguagem, já permite o desenvolvimento de *scripts* bastante complexos e interessantes, como pode ser visto em muitos dos casos de estudo. Ainda assim, é indiscutível que existem ainda uma enorme quantidade de métodos e primitivas ligadas à teoria musical ou à geração procedural de música por adicionar, pois tal é uma tarefa sempre em evolução.

Ficamos também muitos satisfeitos por reutilizar padrões, técnicas e bibliotecas onde existem já soluções bem estabelecidas, tanto a nível de formatos de *input/output*, como o caso do formato *MIDI* ou *abc*, que nos permitem apanhar boleia de todo o ecossistema de ferramentas construído já à sua volta. Também a utilização de módulos como o FluitSynth, que nos permitiu não só fazer programas que escrevessem ou returnassem notação musical como resultado, mas tocassem as notas em *realtime*, com suporte para vários instrumentos, sem o utilizador necessitar de configurar nada externo à aplicação, tornou-a a nosso ver muito mais interessante. Por fim, a utilização de notação existente (como a do *abc notation*) dentro da nossa própria linguagem reduz imenso a curva de aprendizagem necessária para alguém (quer já seja músico ou não) se tornar proeficiente com ela.

Tudo isto resulta, na nossa opinião, num projeto que não reinventa a roda, mas sim adota os standards existentes onde estes fazem sentido, e pode assim focar-se em colmatar as áreas que realmente faltavam no ecossistema: uma linguagem declarativa e dinâmica para descrição de acompanhamentos musicais, e da possibilidade de criação de teclados interativos que combinam sem fricção com o resto da linguagem.

E assim esperamos que este projeto sirva como uma fundação. Que permita a mais pessoas no futuro fazer como nós fizemos, aproveitando as ideias que já existam e encontrem novas aberturas na área da música computacional. E desta vez aproveitando boleia da nossa linguagem, como nós fizemos também, criem novos projetos, novas ideias e novas possibilidades.

Bibliografia

- [1] S. Aaron. "Sonic Pi – performance in education, technology and art". Em: *International Journal of Performance Arts and Digital Media* 12.2 (2016), pp. 171–178. doi: [10 . 1080 / 14794713 . 2016 . 1227593](https://doi.org/10.1080/14794713.2016.1227593). eprint: [https : / / doi . org / 10 . 1080 / 14794713 . 2016 . 1227593](https://doi.org/10.1080/14794713.2016.1227593). url: <https://doi.org/10.1080/14794713.2016.1227593>.
- [2] *ABC Notation*. <http://abcnotation.com/>. url: <http://abcnotation.com/>.
- [3] *ABC Notation Examples*. <http://abcnotation.com/examples>. 2011. url: <http://abcnotation.com/examples>.
- [4] *ABC Notation Standard v2.1*. 2011. url: <http://abcnotation.com/wiki/abc:standard:v2.1>.
- [5] *alda*. <https://alda.io/>. url: <https://alda.io/>.
- [6] *Dangling else*. https://en.wikipedia.org/wiki/Dangling_else. url: https://en.wikipedia.org/wiki/Dangling_else.
- [7] *FAUST*. <https://faust.grame.fr/>. url: <https://faust.grame.fr/>.
- [8] *FAUST Examples*. <https://faust.grame.fr/doc/libraries/>. url: <https://faust.grame.fr/doc/libraries/>.
- [9] *FAUST Libraries*. <https://faust.grame.fr/doc/libraries/>. url: <https://faust.grame.fr/doc/libraries/>.
- [10] *FAUST Quick Start*. <https://faust.grame.fr/doc/examples/index.html>. url: <https://faust.grame.fr/doc/examples/index.html>.
- [11] *FAUST Targets*. url: <https://faust.grame.fr/doc/manual/#a-quick-tour-of-the-faust-targets>.
- [12] *FluidSynth*. <http://www.fluidsynth.org/>. url: <http://www.fluidsynth.org/>.
- [13] *FluidSynth Settings*. <http://www.fluidsynth.org/api/fluidsettings.xml>. url: <http://www.fluidsynth.org/api/fluidsettings.xml>.
- [14] G. Gonzato. *Making Music with ABC 2*. 2019.
- [15] *Helmholtz Pitch Notation*. https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_pitch_notation. url: https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_pitch_notation.

-
- [16] J. McCartney. “Rethinking the Computer Music Language: SuperCollider”. Em: *Computer Music Journal* 26.4 (2002), pp. 61–68. doi: [10 . 1162 / 014892602320991383](https://doi.org/10.1162/014892602320991383). eprint: [https : // doi . org / 10 . 1162 / 014892602320991383](https://doi.org/10.1162/014892602320991383). url: [https : // doi . org / 10 . 1162 / 014892602320991383](https://doi.org/10.1162/014892602320991383).
- [17] Y. Orlarey, D. Fober e S. Letz. “FAUST : an Efficient Functional Approach to DSP Programming”. Em: *NEW COMPUTATIONAL PARADIGMS FOR COMPUTER MUSIC*. Ed. por E. D. FRANCE. 2009, pp. 65–96. url: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02159014>.
- [18] *Sonic Pi*. <https://sonic-pi.net/>. url: <https://sonic-pi.net/>.
- [19] *Sonic Pi Fx Cheatsheet*. <https://github.com/samaaron/sonic-pi/blob/master/etc/doc/cheatsheets/fx.md>. url: [https : // github . com / samaaron / sonic - pi / blob / master / etc / doc / cheatsheets / fx . md](https://github.com/samaaron/sonic-pi/blob/master/etc/doc/cheatsheets/fx.md).
- [20] *SoundFont Technical Specification*. Rel. téc. 2006. url: <http://www.synthfont.com/sfspec24.pdf>.
- [21] *TiMidity++*. <http://timidity.sourceforge.net/>. url: <http://timidity.sourceforge.net/>.
- [22] G. Wang, P. R. Cook e S. Salazar. “Chuck: A Strongly Timed Computer Music Language”. Em: *Computer Music Journal* 39.4 (2015), pp. 10–29. doi: [10 . 1162 / COMJ \ _ a \ _ 00324](https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00324). eprint: https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00324. url: https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00324.
- [23] N. Whitehead. *pyfluidsynth*. <https://github.com/nwhitehead/pyfluidsynth>. 2019. url: <https://github.com/nwhitehead/pyfluidsynth>.
- [24] *WildMidi*. [https : // www . mindwerks . net / projects / wildmidi/](https://www.mindwerks.net/projects/wildmidi/). url: [https : // www . mindwerks.net/projects/wildmidi/](https://www.mindwerks.net/projects/wildmidi/).

.1 Apéndice 1: Gramática

```

1  main <- body EOF;
2
3  body <- statement ( ";" statement )* _ ";"? _
4      / ""
5      ;
6
7  // Statements
8  statement <- _ ( var_declaration / voice_declaration / import / for_loop_statement /
    ↪ while_loop_statement
9      / if_statement / return_statement / python_statement / expression ) _;
10
11 import <- "import" _ namespaced
12     / "import" _ string_value
13     ;
14
15 var_declaration <- expression _ var_declaration_infix? "=" _ expression;
16
17 var_declaration_infix <- "+" / "-" / "/" / "*" / "|" / "&";
18
19 voice_declaration <- !":" ":" namespaced _ "=" _ voice_declaration_body;
20
21 voice_declaration_body <- !":" ":" ":" namespaced _ "(" _ expression _ ")"
22     / expression
23     ;
24
25 function_declaration <- "fun" _ namespaced? _ "(" _ arguments? _ ")" _ "{" body "}"
26     / "fun" _ namespaced? _ "(" _ arguments? _ ")" _ ">" _ expression
27     ;
28
29 arguments <- single_argument ( _ arguments_separator _ single_argument )*;
30
31 single_argument <- single_argument_prefix _ "$" identifier _ "=" _ expression
32     / single_argument_prefix _ "$" identifier
33     ;
34
35 single_argument_prefix <- "expr" / "ref" / "in" / "";
36
37 arguments_separator <- ',' / ';';
38
39 for_variables <- variable ( _ arguments_separator _ variable )*;
40
41 for_loop_head <- "for" _ "(" _ for_variables _ "in" _ value_expression _ ".." _
    ↪ value_expression _ ")"

```

```

42         / "for" _ "(" _ for_variables _ "in" _ value_expression _ ")"
43         ;
44
45 for_loop_statement <- for_loop_head _ "{" _ body? _ "}";
46
47 while_loop_statement <- "while" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ body _ "}";
48
49 if_statement <- "if" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ body _ "}" _ "else" _ "{" _ body _ "}"
50         / "if" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ body _ "}"
51         ;
52
53 return_statement <- "return" _ expression?;
54
55 // BEGIN Keyboard
56 keyboard_declaration <- "@keyboard" ( _ alphanumeric)* ( _ group )? _ "{" _ keyboard_body _ "}"
57         ↪ ;
58
59 keyboard_body <- keyboard_body_statement ( _ ";" _ keyboard_body_statement )* _ ";"?
60         / ""
61         ;
62
63 keyboard_body_statement <- keyboard_for
64         / keyboard_while
65         / keyboard_if
66         / keyboard_block
67         / keyboard_shortcut
68         ;
69
70 keyboard_for <- for_loop_head _ "{" _ keyboard_body _ "}";
71
72 keyboard_while <- "while" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ keyboard_body _ "}";
73
74 keyboard_if <- "if" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ keyboard_body _ "}" _ "else" _ "{" _
75         ↪ keyboard_body _ "}"
76         / "if" _ "(" _ expression _ ")" _ "{" _ keyboard_body _ "}"
77         ;
78
79 keyboard_block <- "{" _ body _ "}";
80
81 keyboard_shortcut <- keyboard_shortcut_key _ keyboard_arguments? _ ":" _ expression
82         ;
83
84 list_comprehension <- expression "for" _ "$" _ namespaced _ "in" _ value_expression _ ".." _
85         ↪ value_expression

```

```

83         / expression "for" _ "$" _ namespaces _ "in" _ value_expression _ ".." _
           ↪ value_expression _ "if" value_expression
84     ;
85
86 keyboard_shortcut_key <- alphanumeric ( _ "+" _ alphanumeric ) * ( _ alphanumeric ) *
87     / string_value ( _ alphanumeric ) *
88     / "[" _ list_comprehension _ "]" ( alphanumeric _ ) *
89     / "[" _ value_expression _ "]" ( alphanumeric _ ) *
90     ;
91
92 keyboard_arguments <- "(" _ ( keyboard_single_argument ( _ arguments_separator _
           ↪ keyboard_single_argument ) * ) ? _ ")" ;
93
94 keyboard_arguments_separator <- ',' / ';' ;
95
96 keyboard_single_argument <- "$" identifier ;
97 // END Keyboard
98
99 python_expression <- "@py" _ "{" _ python_expression_body _ "}";
100
101 python_expression_body <- r"^[^}]*";
102
103 python_statement <- "@python" python_statement_body ;
104
105 python_statement_body <- ( r"[*]" r"\r?\n"? ) * ;
106
107 expression <- e music_expression ;
108
109 music_expression <- sequence ( _ "|" _ sequence ) * ;
110
111 sequence <- value_expression ( _ value_expression ) * ;
112
113 group <- "(" _ expression _ ")" ;
114
115 block <- "{" _ body _ "}";
116
117 variable <- "$" namespaces ;
118
119 function <- namespaces "(" _ function_parameters _ ")" ;
120
121 function_parameters <- named_parameters
122     / positional_parameters ( _ parameters_separator _ named_parameters ) ?
123     / e
124     ;
125

```

```

126 positional_parameters <- !named_parameter expression ( _ parameters_separator _ !
    ↪ named_parameter expression );
127
128 named_parameters <- named_parameter ( _ parameters_separator _ named_parameter );
129
130 named_parameter <- identifier _ '=' _ expression;
131
132 parameters_separator <- ',' / ';';
133
134 note <- note_pitch note_value?;
135
136 chord <- "[" _ note_pitch chord_suffix _ "]" note_value?
137     / "[" ( _ note_pitch )+ _ "]" note_value?
138     ;
139
140 chord_suffix <- 'm7' / 'M7' / 'dom7' / '7' / 'm7b5' / 'dim7' / 'mM7'
141     / '5'
142     / 'M' / 'm' / 'aug' / 'dim' / '+'
143     ;
144
145 rest <- "r" note_value?;
146
147 note_value
148     <- "/" _ integer
149     / integer _ "/" _ integer
150     / integer
151     ;
152
153 note_pitch <- note_accidental _ note_pitch_raw;
154
155 note_accidental <- "^" / "^^" / "__" / "_" / "";
156
157 note_pitch_raw <- r"[cdefgab]" "'"*
158     / r"[CDEFGAB]" ", "*
159     ;
160
161 modifier
162     <- r"[tT]" _ integer
163     / r"[vV]" _ integer
164     / r"[iI]" _ integer
165     / r"[lL]" _ note_value
166     / r"[sS]" _ integer _ "/" _ integer
167     / r"[sS]" _ integer
168     / r"[oO]" _ integer
169     ;

```

```

170
171 instrument_modifier <- !":" ":" ( namespace / "?" ) _ sequence;
172
173 value_expression <- e binary_logic_operator_expression;
174
175 binary_logic_operator_expression <- binary_comparison_operator_expression _ ("and" / "or") _
    ↳ binary_logic_operator_expression
    / binary_comparison_operator_expression
176
177 ;
178
179 binary_comparison_operator_expression <- binary_sum_operator_expression _ (">=" / ">" / "==" /
    ↳ "!=" / "<=" / "<") _ binary_comparison_operator_expression
    / binary_sum_operator_expression
180
181 ;
182
183 binary_sum_operator_expression <- binary_mult_operator_expression _ r"[+\\-]" _
    ↳ binary_sum_operator_expression
    / binary_mult_operator_expression
184
185 ;
186
187 binary_mult_operator_expression <- unary_operator_expression _ r"(\*\*|\*|\/)" _
    ↳ binary_mult_operator_expression
    / unary_operator_expression
188
189 ;
190
191 unary_operator_expression <- ( "not" / "" ) _ expression_single;
192
193 expression_single <- expression_single_prefix ( ( _ property_accessor ) / property_call );
194
195 expression_single_prefix <- function_declaration / string_value / number_value / bool_value /
    ↳ none_value / variable / function / keyboard_declaration / python_expression /
    ↳ array_value / object_value / group / block / chord / note / rest / modifier /
    ↳ instrument_modifier;
196
197 property_accessor <- ":" _ ( identifier / ( "[" _ expression _ "]" ) );
198
199 property_call <- "(" _ function_parameters _ ")";
200
201 array_value <- "@[" _ "]"
202 / "@[" _ expression ( _ array_separator _ expression ) * _ "]"
203 ;
204
205 array_separator <- ',' / ';';
206
207 object_value <- "@{" _ "}"

```



```

208         / "@{" _ object_value_item ( _ object_separator _ object_value_item )* _ "}"
209         ;
210
211 object_value_item <- object_value_key _ '=' _ expression;
212
213 object_value_key <- identifier / float / integer / double_string / single_string;
214
215 object_separator <- ',' / ';';
216
217 string_value <- double_string / single_string;
218
219 double_string <- "\"" double_string_char* "\"";
220
221 double_string_char
222     <- "\\\""
223     / "\\\\"
224     / r"^[^"]"
225     ;
226
227 single_string <- "'" single_string_char* "'";
228
229 single_string_char
230     <- "\\'"
231     / "\\\\"
232     / r"^[^']"
233     ;
234
235 number_value <- float / integer;
236
237 bool_value <- "true" / "false";
238
239 none_value <- "none";
240
241 float <- r"[0-9]+\.[0-9]+";
242
243 integer <- r"[\-\\+]?[0-9]+";
244
245 namespace <- ( identifier "\\\" ) * identifier;
246
247 identifier <- r"[a-zA-Z\\_][a-zA-Z0-9\\_]*";
248
249 alphanumeric <- r"[a-zA-Z0-9\\_]*";
250
251 _ <- r"[ \\t\\r\\n]*";
252

```

```
253 __ <- r"[ \t\r\n]+";  
254  
255 e <- "";  
256  
257 comment <- _ r"#[^\n]*";
```