Cálculo de Programas
Trabalho Prático
MiEI+LCC — Ano Lectivo de 2016/17

Departamento de Informática
Universidade do Minho

Junho de 2017

Grupo nr.	51
a70922	Francisco Sampaio da Costa
a71489	João Luís Martins Areal Vieira
a71369	Octávio José Azevedo Maia

Conteúdo

1 Preâmbulo

A disciplina de Cálculo de Programas tem como objectivo principal ensinar a programação de computadores como uma disciplina científica. Para isso parte-se de um repertório de *combinadores* que formam uma álgebra da programação (conjunto de leis universais e seus corolários) e usam-se esses combinadores para construir programas *composicionalmente*, isto é, agregando programas já existentes.

Na sequência pedagógica dos planos de estudo dos dois cursos que têm esta disciplina, restringe-se a aplicação deste método ao desenvolvimento de programas funcionais na linguagem Haskell.

O presente trabalho tem por objectivo concretizar na prática os objectivos da disciplina, colocando os alunos perante problemas de programação que deverão ser abordados composicionalmente e implementados em Haskell. Há ainda um outro objectivo: o de ensinar a documentar programas e a produzir textos técnico-científicos de qualidade.

2 Documentação

Para cumprir de forma integrada os objectivos enunciados acima vamos recorrer a uma técnica de programação dita "literária" [3], cujo princípio base é o seguinte:

> *Um programa e a sua documentação devem coincidir.*

Por outras palavras, o código fonte e a sua documentação deverão constar do mesmo documento (ficheiro).

O ficheiro `cp1617t.pdf` que está a ler é já um exemplo de programação literária: foi gerado a partir do texto fonte `cp1617t.lhs`[1] que encontrará no material pedagógico desta disciplina descompactando o ficheiro `cp1617t.zip` e executando

```
lhs2TeX cp1617t.lhs > cp1617t.tex
pdflatex cp1617t
```

em que `lhs2tex` é um pre-processador que faz "pretty printing" de código Haskell em LaTeX e que deve desde já instalar a partir do endereço

`https://hackage.haskell.org/package/lhs2tex`.

Por outro lado, o mesmo ficheiro `cp1617t.lhs` é executável e contém o "kit" básico, escrito em Haskell, para realizar o trabalho. Basta executar

```
ghci cp1617t.lhs
```

para ver que assim é:

```
GHCi, version 8.0.2: http://www.haskell.org/ghc/  :? for help
[ 1 of 11] Compiling Show              ( Show.hs, interpreted )
[ 2 of 11] Compiling ListUtils         ( ListUtils.hs, interpreted )
[ 3 of 11] Compiling Probability       ( Probability.hs, interpreted )
[ 4 of 11] Compiling Cp                ( Cp.hs, interpreted )
[ 5 of 11] Compiling Nat               ( Nat.hs, interpreted )
[ 6 of 11] Compiling List              ( List.hs, interpreted )
[ 7 of 11] Compiling LTree             ( LTree.hs, interpreted )
[ 8 of 11] Compiling St                ( St.hs, interpreted )
[ 9 of 11] Compiling BTree             ( BTree.hs, interpreted )
[10 of 11] Compiling Exp               ( Exp.hs, interpreted )
[11 of 11] Compiling Main              ( cp1617t.lhs, interpreted )
Ok, modules loaded: BTree, Cp, Exp, LTree, List, ListUtils, Main, Nat,
Probability, Show, St.
```

O facto de o interpretador carregar as bibliotecas do material pedagógico da disciplina, entre outras, deve-se ao facto de, neste mesmo sítio do texto fonte, se ter inserido o seguinte código Haskell:

import *Cp*
import *List*

[1] O suffixo 'lhs' quer dizer *literate Haskell*.

$\mathbf{import}\ Nat$
$\mathbf{import}\ Exp$
$\mathbf{import}\ \mathsf{BTree}$
$\mathbf{import}\ \mathsf{LTree}$
$\mathbf{import}\ St$
$\mathbf{import}\ Probability\ hiding\ (cond)$
$\mathbf{import}\ Data.List$
$\mathbf{import}\ Test.QuickCheck\ hiding\ ((\times))$
$\mathbf{import}\ System.Random\ hiding\ \langle\cdot,\cdot\rangle$
$\mathbf{import}\ GHC.\mathsf{IO}.Exception$
$\mathbf{import}\ System.\mathsf{IO}.Unsafe$

Abra o ficheiro `cp1617t.lhs` no seu editor de texto preferido e verifique que assim é: todo o texto que se encontra dentro do ambiente

```
\begin{code}
...
\end{code}
```

vai ser seleccionado pelo GHCi para ser executado.

3 Como realizar o trabalho

Este trabalho teórico-prático deve ser realizado por grupos de três alunos. Os detalhes da avaliação (datas para submissão do relatório e sua defesa oral) são os que forem publicados na página da disciplina na *internet*. Recomenda-se uma abordagem equilibrada e participativa dos membros do grupo de trabalho por forma a poderem responder às questões que serão colocadas na defesa oral do relatório.

Em que consiste, então, o *relatório* a que se refere o parágrafo anterior? É a edição do texto que está a ser lido, preenchendo o anexo C com as suas respostas. O relatório deverá conter ainda a identificação dos membros do grupo de trabalho, no local respectivo da folha de rosto.

Para gerar o PDF integral do relatório deve-se ainda correr os comando seguintes, que actualizam a bibliografia (com BibTEX) e o índice remissivo (com `makeindex`),

```
bibtex cp1617t.aux
makeindex cp1617t.idx
```

e recompilar o texto como acima se indicou. Dever-se-á ainda instalar o utilitário QuickCheck [2] que ajuda a validar programas em Haskell.

Problema 1

O controlador de um processo físico baseia-se em dezenas de sensores que enviam as suas leituras para um sistema central, onde é feito o respectivo processamento.

Verificando-se que o sistema central está muito sobrecarregado, surgiu a ideia de equipar cada sensor com um microcontrolador que faça algum pré-processamento das leituras antes de as enviar ao sistema central. Esse tratamento envolve as operações (em vírgula flutuante) de soma, subtracção, multiplicação e divisão.

Há, contudo, uma dificuldade: o código da divisão não cabe na memória do microcontrolador, e não se pretende investir em novos microcontroladores devido à sua elevada quantidade e preço.

Olhando para o código a replicar pelos microcontroladores, alguém verificou que a divisão só é usada para calcular inversos, $\frac{1}{x}$. Calibrando os sensores foi possível garantir que os valores a inverter estão entre $1 < x < 2$, podendo-se então recorrer à série de Maclaurin

$$\frac{1}{x} = \sum_{i=0}^{\infty} (1-x)^i$$

para calcular $\frac{1}{x}$ sem fazer divisões. Seja então

$$inv\ x\ n = \sum_{i=0}^{n} (1-x)^i$$

[2] Para uma breve introdução ver e.g. `https://en.wikipedia.org/wiki/QuickCheck`.

a função que aproxima $\frac{1}{x}$ com n iterações da série de MacLaurin. Mostre que $inv\ x$ é um ciclo-for, implementando-o em Haskell (e opcionalmente em C). Deverá ainda apresentar testes em QuickCheck que verifiquem o funcionamento da sua solução. (**Sugestão:** inspire-se no problema semelhante relativo à função ns da secção 3.16 dos apontamentos [4].)

Problema 2

Se digitar *man wc* na shell do Unix (Linux) obterá:

```
NAME
     wc -- word, line, character, and byte count

SYNOPSIS
     wc [-clmw] [file ...]

DESCRIPTION
    The wc utility displays the number of lines, words, and bytes contained in
    each input file,  or standard input (if no file is specified) to the stan-
    dard  output.  A line is defined as  a string of characters delimited by a
    <newline> character.  Characters beyond the final <newline> character will
    not be included in the line count.
    (...)
    The following options are available:
    (...)
        -w   The number of words in each input file is written to the standard
             output.
    (...)
```

Se olharmos para o código da função que, em C, implementa esta funcionalidade [2] e nos focarmos apenas na parte que implementa a opção `-w`, verificamos que a poderíamos escrever, em Haskell, da forma seguinte:

$$
\begin{array}{l}
wc\_w :: [\mathit{Char}] \rightarrow \mathit{Int} \\
wc\_w\ [\,] = 0 \\
wc\_w\ (c : l) = \\
\quad \textbf{if}\ \neg\ (sep\ c) \wedge lookahead\_sep\ l \\
\quad \textbf{then}\ wc\_w\ l + 1 \\
\quad \textbf{else}\ wc\_w\ l \\
\qquad \textbf{where} \\
\qquad\quad sep\ c = (c \equiv \texttt{'\ '} \vee c \equiv \texttt{'\textbackslash n'} \vee c \equiv \texttt{'\textbackslash t'}) \\
\qquad\quad lookahead\_sep\ [\,] = \mathit{True} \\
\qquad\quad lookahead\_sep\ (c : l) = sep\ c
\end{array}
$$

Re-implemente esta função segundo o modelo *worker/wrapper* onde *wrapper* deverá ser um catamorfismos de listas. Apresente os cálculos que fez para chegar a essa sua versão de wc_w e inclua testes em QuickCheck que verifiquem o funcionamento da sua solução. (**Sugestão:** aplique a lei de recursividade múltipla às funções wc_w e $lookahead\_sep$.)

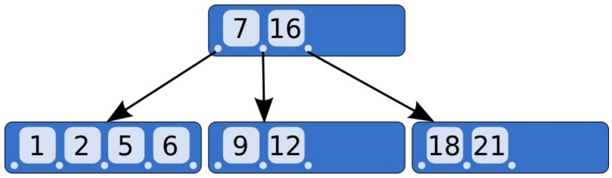
Problema 3

Uma "B-tree"é uma generalização das árvores binárias do módulo BTree a mais do que duas sub-árvores por nó:

$$\textbf{data}\ \text{B-tree}\ a = \mathit{Nil} \mid \mathit{Block}\ \{ \mathit{leftmost} :: \text{B-tree}\ a, \mathit{block} :: [(a, \text{B-tree}\ a)] \}\ \textbf{deriving}\ (\mathit{Show}, \mathit{Eq})$$

Por exemplo, a B-tree[3]

[3]Créditos: figura extraída de https://en.wikipedia.org/wiki/B-tree.



é representada no tipo acima por:

$$
\begin{array}{l}
t = \mathit{Block}\ \{\\
\quad \mathit{leftmost} = \mathit{Block}\ \{\\
\quad\quad \mathit{leftmost} = \mathit{Nil},\\
\quad\quad \mathit{block} = [(1, \mathit{Nil}), (2, \mathit{Nil}), (5, \mathit{Nil}), (6, \mathit{Nil})]\},\\
\quad \mathit{block} = [\\
\quad\quad (7, \mathit{Block}\ \{\\
\quad\quad\quad \mathit{leftmost} = \mathit{Nil},\\
\quad\quad\quad \mathit{block} = [(9, \mathit{Nil}), (12, \mathit{Nil})]\}),\\
\quad\quad (16, \mathit{Block}\ \{\\
\quad\quad\quad \mathit{leftmost} = \mathit{Nil},\\
\quad\quad\quad \mathit{block} = [(18, \mathit{Nil}), (21, \mathit{Nil})]\})\\
\quad\quad]\}
\end{array}
$$

Pretende-se, neste problema:

1. Construir uma biblioteca para o tipo B-tree da forma habitual (in + out; ana + cata + hylo; instância na classe $\mathit{Functor}$).
2. Definir como um catamorfismo a função $\mathit{inordB\_tree} :: \text{B-tree}\ t \rightarrow [t]$ que faça travessias "inorder"de árvores deste tipo.
3. Definir como um catamorfismo a função $\mathit{largestBlock} :: \text{B-tree}\ a \rightarrow \mathit{Int}$ que detecta o tamanho do maior bloco da árvore argumento.
4. Definir como um anamorfismo a função $\mathit{mirrorB\_tree} :: \text{B-tree}\ a \rightarrow \text{B-tree}\ a$ que roda a árvore argumento de 180º
5. Adaptar ao tipo B-tree o hilomorfismo "quick sort"do módulo BTree. O respectivo anamorfismo deverá basear-se no gene $\mathit{lsplitB\_tree}$ cujo funcionamento se sugere a seguir:

$$
\begin{array}{l}
\mathit{lsplitB\_tree}\ [\,] = i_1\ ()\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ [7] = i_2\ ([\,], [(7, [\,])])\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ [5, 7, 1, 9] = i_2\ ([1], [(5, [\,]), (7, [9])])\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ [7, 5, 1, 9] = i_2\ ([1], [(5, [\,]), (7, [9])])
\end{array}
$$

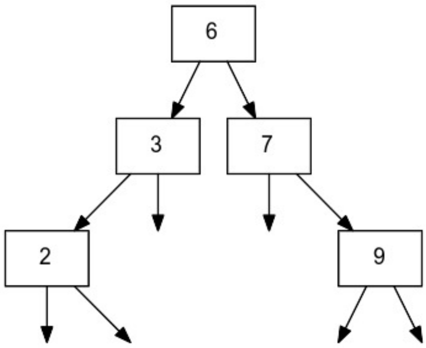
6. A biblioteca Exp permite representar árvores-expressão em formato DOT, que pode ser lido por aplicações como por exemplo Graphviz, produzindo as respectivas imagens. Por exemplo, para o caso de árvores BTree, se definirmos

$$
\begin{array}{l}
\mathit{dotBTree} :: \mathit{Show}\ a \Rightarrow \mathsf{BTree}\ a \rightarrow \mathsf{IO}\ \mathit{ExitCode}\\
\mathit{dotBTree} = \mathit{dotpict} \cdot \mathit{bmap}\ \mathit{nothing}\ (\mathit{Just} \cdot \mathit{show}) \cdot \mathit{cBTree2Exp}
\end{array}
$$

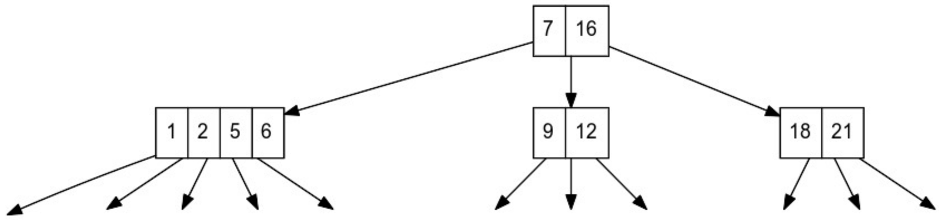
executando $\mathit{dotBTree}\ t$ para

$$
t = \mathit{Node}\ (6, (\mathit{Node}\ (3, (\mathit{Node}\ (2, (\mathit{Empty}, \mathit{Empty})), \mathit{Empty})), \mathit{Node}\ (7, (\mathit{Empty}, \mathit{Node}\ (9, (\mathit{Empty}, \mathit{Empty}))))))
$$

obter-se-á a imagem



Escreva de forma semelhante uma função $dotB\_tree$ que permita mostrar em Graphviz[4] árvores B-tree tal como se ilustra a seguir,



para a árvora dada acima.

Problema 4

Nesta disciplina estudaram-se funções mutuamente recursivas e como lidar com elas. Os tipos indutivos de dados podem, eles próprios, ser mutuamente recursivos. Um exemplo dessa situação são os chamados L-Systems.

Um L-System é um conjunto de regras de produção que podem ser usadas para gerar padrões por re-escrita sucessiva, de acordo com essas mesmas regras. Tal como numa gramática, há um axioma ou símbolo inicial, de onde se parte para aplicar as regras. Um exemplo célebre é o do crescimento de algas formalizado por Lindenmayer[5] no sistema:

Variáveis: A e B
Constantes: nenhuma
Axioma: A
Regras: $A \to A\ B, B \to A$.

Quer dizer, em cada iteração do "crescimento"da alga, cada A deriva num par $A\ B$ e cada B converte-se num A. Assim, ter-se-á, onde n é o número de iterações desse processo:

- $n = 0$: A
- $n = 1$: $A\ B$
- $n = 2$: $A\ B\ A$
- $n = 3$: $A\ B\ A\ A\ B$
- etc

[4]Como alternativa a instalar Graphviz, podem usar WebGraphviz num browser.
[5]Ver `https://en.wikipedia.org/wiki/Aristid_Lindenmayer`.

Este L-System pode codificar-se em Haskell considerando cada variável um tipo, a que se adiciona um caso de paragem para poder expressar as sucessivas iterações:

$$
\begin{array}{l}
\textbf{type } Algae = A \\
\textbf{data } A = \mathrm{NA} \mid A\ A\ B\ \textbf{deriving } Show \\
\textbf{data } B = \mathrm{NB} \mid B\ A\ \textbf{deriving } Show
\end{array}
$$

Observa-se aqui já que A e B são mutuamente recursivos. Os isomorfismos in/out são definidos da forma habitual:

$$
\begin{array}{l}
inA :: 1 + A \times B \to A \\
inA = [\underline{\mathrm{NA}}, \widehat{A}] \\
outA :: A \to 1 + A \times B \\
outA\ \mathrm{NA} = i_1\ () \\
outA\ (A\ a\ b) = i_2\ (a, b) \\
inB :: 1 + A \to B \\
inB = [\underline{\mathrm{NB}}, B] \\
outB :: B \to 1 + A \\
outB\ \mathrm{NB} = i_1\ () \\
outB\ (B\ a) = i_2\ a
\end{array}
$$

O functor é, em ambos os casos, $\mathsf{F}\ X = 1 + X$. Contudo, os catamorfismos de A têm de ser estendidos com mais um gene, de forma a processar também os B,

$$
\begin{array}{l}
(\!|\cdot\ \cdot|\!)_A :: (1 + c \times d \to c) \to (1 + c \to d) \to A \to c \\
(\!|ga\ gb|\!)_A = ga \cdot (id + (\!|ga\ gb|\!)_A \times (\!|ga\ gb|\!)_B) \cdot outA
\end{array}
$$

e a mesma coisa para os Bs:

$$
\begin{array}{l}
(\!|\cdot\ \cdot|\!)_B :: (1 + c \times d \to c) \to (1 + c \to d) \to B \to d \\
(\!|ga\ gb|\!)_B = gb \cdot (id + (\!|ga\ gb|\!)_A) \cdot outB
\end{array}
$$

Pretende-se, neste problema:

1. A definição dos anamorfimos dos tipos A e B.
2. A definição da função

   $$generateAlgae :: Int \to Algae$$

   como anamorfismo de *Algae* e da função

   $$showAlgae :: Algae \to String$$

   como catamorfismo de *Algae*.
3. Use QuickCheck para verificar a seguinte propriedade:

   $$\mathsf{length} \cdot showAlgae \cdot generateAlgae = fib \cdot \mathsf{succ}$$

Problema 5

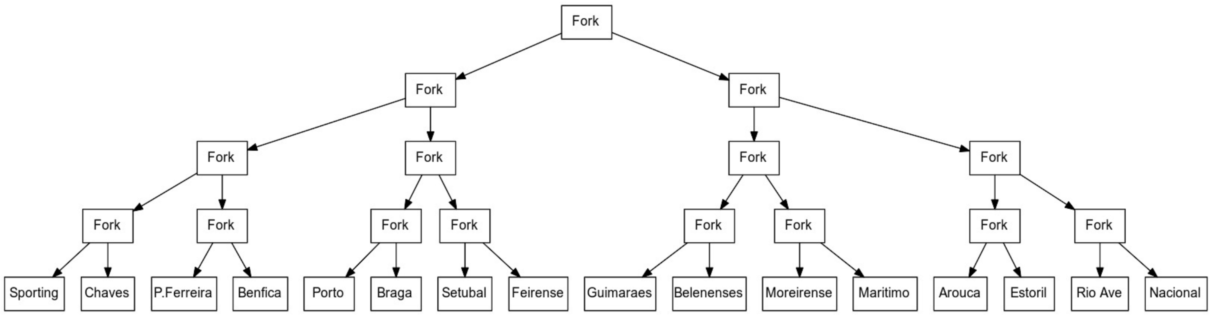
O ponto de partida deste problema é um conjunto de equipas de futebol, por exemplo:

```
equipas :: [Equipa]
equipas = [
  "Arouca","Belenenses","Benfica","Braga","Chaves","Feirense",
  "Guimaraes","Maritimo","Moreirense","Nacional","P.Ferreira",
  "Porto","Rio Ave","Setubal","Sporting","Estoril"
  ]
```

Assume-se que há uma função $f\ (e_1, e_2)$ que dá — baseando-se em informação acumulada historicamente, e.g. estatística — qual a probabilidade de e_1 ou e_2 ganharem um jogo entre si.[6] Por exemplo, f ("Arouca", "Braga") poderá dar como resultado a distribuição

indicando que há 71.4% de probabilidades de "Braga" ganhar a "Arouca".

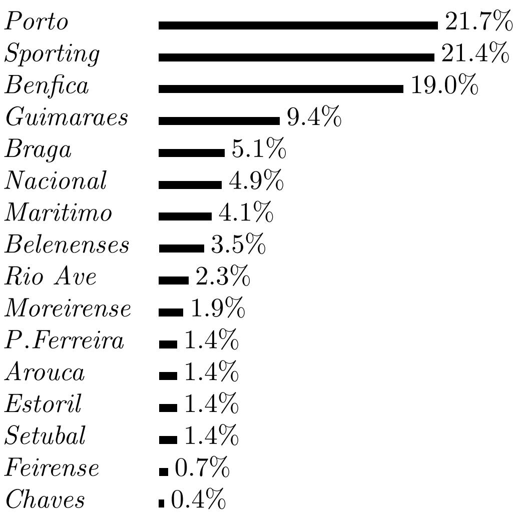
Para lidarmos com probabilidades vamos usar o mónade Dist a que vem descrito no apêndice A e que está implementado na biblioteca Probability [1] — ver definição (1) mais adiante. A primeira parte do problema consiste em sortear *aleatoriamente* os jogos das equipas. O resultado deverá ser uma LTree contendo, nas folhas, os jogos da primeira eliminatória e cujos nós indicam quem joga com quem (vencendo), à medida que a eliminatória prossegue:



A segunda parte do problema consiste em processar essa árvore usando a função

$$jogo :: (Equipa, Equipa) \rightarrow \mathsf{Dist}\ Equipa$$

que foi referida acima. Essa função simula um qualquer jogo, como foi acima dito, dando o resultado de forma probabilística. Por exemplo, para o sorteio acima e a função *jogo* que é dada neste enunciado[7], a probabilidade de cada equipa vir a ganhar a competição vem dada na distribuição seguinte:



Assumindo como dada e fixa a função *jogo* acima referida, juntando as duas partes obteremos um *hilomorfismo* de tipo $[Equipa] \rightarrow \mathsf{Dist}\ Equipa$,

$$quem\_vence :: [Equipa] \rightarrow \mathsf{Dist}\ Equipa$$
$$quem\_vence = eliminatoria \cdot sorteio$$

com características especiais: é aleatório no anamorfismo (sorteio) e probabilístico no catamorfismo (eliminatória).

[6] Tratando-se de jogos eliminatórios, não há lugar a empates.

[7] Pode, se desejar, criar a sua própria função *jogo*, mas para efeitos de avaliação terá que ser usada a que vem dada neste enunciado. Uma versão de *jogo* realista teria que ter em conta todas as estatísticas de jogos entre as equipas em jogo, etc etc.

O anamorfismo $sorteio :: [Equipa] \rightarrow \mathsf{LTree}\ Equipa$ tem a seguinte arquitectura, [8]

$$sorteio = anaLTree\ lsplit \cdot envia \cdot permuta$$

reutilizando o anamorfismo do algoritmo de "merge sort", da biblioteca LTree, para construir a árvore de jogos a partir de uma permutação aleatória das equipas gerada pela função genérica

$$permuta :: [a] \rightarrow \mathsf{IO}\ [a]$$

A presença do mónade de IO tem a ver com a geração de números aleatórios[9].

1. Defina a função monádica $permuta$ sabendo que tem já disponível

   $$getR :: [a] \rightarrow \mathsf{IO}\ (a, [a])$$

   $getR\ x$ dá como resultado um par (h, t) em que h é um elemento de x tirado à sorte e t é a lista sem esse elemento – mas esse par vem encapsulado dentro de IO.

2. A segunda parte do exercício consiste em definir a função monádica

   $$eliminatoria :: \mathsf{LTree}\ Equipa \rightarrow \mathsf{Dist}\ Equipa$$

   que, assumindo já disponível a função $jogo$ acima referida, dá como resultado a distribuição de equipas vencedoras do campeonato.

Sugestão: inspire-se na secção 4.10 (*'Monadification' of Haskell code made easy*) dos apontamentos [4].

Referências

[1] M. Erwig and S. Kollmansberger. Functional pearls: Probabilistic functional programming in Haskell. *J. Funct. Program.*, 16:21–34, January 2006.

[2] B.W. Kernighan and D.M. Richtie. *The C Programming Language*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1978.

[3] D.E. Knuth. *Literate Programming*. CSLI Lecture Notes Number 27. Stanford University Center for the Study of Language and Information, Stanford, CA, USA, 1992.

[4] J.N. Oliveira. *Program Design by Calculation*, 2008. Draft of textbook in preparation. viii+297 pages. Informatics Department, University of Minho.

[8] A função $envia$ não é importante para o processo; apenas se destina a simplificar a arquitectura monádica da solução.

[9] Quem estiver interessado em detalhes deverá consultar System.Random.

Anexos

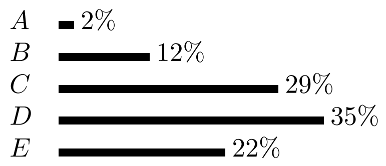
A Mónade para probabilidades e estatística

Mónades são functores com propriedades adicionais que nos permitem obter efeitos especiais em programação. Por exemplo, a biblioteca Probability oferece um mónade para abordar problemas de probabilidades. Nesta biblioteca, o conceito de distribuição estatística é captado pelo tipo

$$\textbf{newtype } \mathsf{Dist}\ a = D\ \{ unD :: [(a, ProbRep)] \} \tag{1}$$

em que $ProbRep$ é um real de 0 a 1, equivalente a uma escala de 0 a 100%.

Cada par (a, p) numa distribuição $d :: \mathsf{Dist}\ a$ indica que a probabilidade de a é p, devendo ser garantida a propriedade de que todas as probabilidades de d somam 100%. Por exemplo, a seguinte distribuição de classificações por escalões de A a E,



será representada pela distribuição

$$\begin{array}{l} d1 :: \mathsf{Dist}\ Char \\ d1 = D\ [(\texttt{'A'}, 0.02), (\texttt{'B'}, 0.12), (\texttt{'C'}, 0.29), (\texttt{'D'}, 0.35), (\texttt{'E'}, 0.22)] \end{array}$$

que o GHCi mostrará assim:

```
'D'  35.0%
'C'  29.0%
'E'  22.0%
'B'  12.0%
'A'   2.0%
```

É possível definir geradores de distribuições, por exemplo distribuições *uniformes*,

$$d2 = uniform\ (words\ \texttt{"Uma frase de cinco palavras"})$$

isto é

```
     "Uma"  20.0%
   "cinco"  20.0%
      "de"  20.0%
   "frase"  20.0%
"palavras"  20.0%
```

distribuição *normais*, eg.

$$d3 = normal\ [10 \mathinner{..} 20]$$

etc.[10]

Dist forma um **mónade** cuja unidade é $return\ a = D\ [(a, 1)]$ e cuja composição de Kleisli é (simplificando a notação)

$$(f \bullet g)\ a = [(y, q * p) \mid (x, p) \leftarrow g\ a, (y, q) \leftarrow f\ x]$$

em que $g : A \rightarrow \mathsf{Dist}\ B$ e $f : B \rightarrow \mathsf{Dist}\ C$ são funções **monádicas** que representam *computações probabilísticas*.

Este mónade é adequado à resolução de problemas de *probabilidades e estatística* usando programação funcional, de forma elegante e como caso particular de programação monádica.

[10] Para mais detalhes ver o código fonte de Probability, que é uma adaptação da biblioteca PHP ("Probabilistic Functional Programming"). Para quem quiser souber mais recomenda-se a leitura do artigo [1].

B Definições auxiliares

São dadas: a função que simula jogos entre equipas,

$$
\begin{array}{l}
\mathbf{type}\ \mathit{Equipa} = \mathit{String}\\
\mathit{jogo} :: (\mathit{Equipa}, \mathit{Equipa}) \rightarrow \mathsf{Dist}\ \mathit{Equipa}\\
\mathit{jogo}\ (e_1, e_2) = D\ [(e_1, 1 - \mathit{r1}\ /\ (\mathit{r1} + \mathit{r2})), (e_2, 1 - \mathit{r2}\ /\ (\mathit{r1} + \mathit{r2}))]\ \mathbf{where}\\
\quad \mathit{r1} = \mathit{rank}\ e_1\\
\quad \mathit{r2} = \mathit{rank}\ e_2\\
\quad \mathit{rank} = \mathit{pap}\ \mathit{ranks}\\
\quad \mathit{ranks} = [\\
\quad\quad (\texttt{"Arouca"}, 5),\\
\quad\quad (\texttt{"Belenenses"}, 3),\\
\quad\quad (\texttt{"Benfica"}, 1),\\
\quad\quad (\texttt{"Braga"}, 2),\\
\quad\quad (\texttt{"Chaves"}, 5),\\
\quad\quad (\texttt{"Feirense"}, 5),\\
\quad\quad (\texttt{"Guimaraes"}, 2),\\
\quad\quad (\texttt{"Maritimo"}, 3),\\
\quad\quad (\texttt{"Moreirense"}, 4),\\
\quad\quad (\texttt{"Nacional"}, 3),\\
\quad\quad (\texttt{"P.Ferreira"}, 3),\\
\quad\quad (\texttt{"Porto"}, 1),\\
\quad\quad (\texttt{"Rio Ave"}, 4),\\
\quad\quad (\texttt{"Setubal"}, 4),\\
\quad\quad (\texttt{"Sporting"}, 1),\\
\quad\quad (\texttt{"Estoril"}, 5)]
\end{array}
$$

a função (monádica) que parte uma lista numa cabeça e cauda *aleatórias*,

$$
\begin{array}{l}
\mathit{getR} :: [a] \rightarrow \mathsf{IO}\ (a, [a])\\
\mathit{getR}\ x = \mathbf{do}\ \{\\
\quad i \leftarrow \mathit{getStdRandom}\ (\mathit{randomR}\ (0, \mathsf{length}\ \ x - 1));\\
\quad \mathit{return}\ (x\ !!\ i, \mathit{retira}\ i\ x)\\
\quad \}\ \mathbf{where}\ \mathit{retira}\ i\ x = \mathit{take}\ i\ x +\!\!+\ \mathit{drop}\ (i + 1)\ x
\end{array}
$$

e algumas funções auxiliares de menor importância: uma que ordena listas com base num atributo (função que induz uma pré-ordem),

$$
\begin{array}{l}
\mathit{presort} :: (\mathit{Ord}\ a, \mathit{Ord}\ b) \Rightarrow (b \rightarrow a) \rightarrow [b] \rightarrow [b]\\
\mathit{presort}\ f = \mathsf{map}\ \ \pi_2 \cdot \mathit{sort} \cdot (\mathsf{map}\ \ (\mathit{fork}\ f\ \mathit{id}))
\end{array}
$$

e outra que converte “look-up tables”em funções (parciais):

$$
\begin{array}{l}
\mathit{pap} :: \mathit{Eq}\ a \Rightarrow [(a, t)] \rightarrow a \rightarrow t\\
\mathit{pap}\ m\ k = \mathit{unJust}\ (\mathit{lookup}\ k\ m)\ \mathbf{where}\ \mathit{unJust}\ (\mathit{Just}\ a) = a
\end{array}
$$

C Soluções propostas

Os alunos devem colocar neste anexo as suas soluções aos exercícios propostos, de acordo com o “layout” que se fornece. Não podem ser alterados os nomes das funções dadas, mas pode ser adicionado texto e / ou outras funções auxiliares que sejam necessárias.

Problema 1

$$\mathit{inv}\ x = \pi_1 \cdot \mathsf{for}\ \langle \widehat{(+)}, ((1 - x)*) \cdot \pi_2 \rangle\ (1, 1 - x)$$

De modo a implementar o mecanismo de *QuickCheck* foi necessário gerar um **Double** entre *1.0* e *2.0*. Para este efeito utilizamos a propriedade *Gen* da biblioteca *QuickCheck*.

Após isto, foi criada a função **testProb1**, responsável por chamar a função *quickCheck* para todos os elementos gerados pelo *genDouble*. Esta função recebe como parâmetro um inteiro **n** responsável pelo número de iterações a realizar.

$$
\begin{array}{l}
\mathit{genDouble} :: \mathit{Gen}\ (\mathit{Double})\\
\mathit{genDouble} = \mathit{Test.QuickCheck.choose}\ (1.0, 2.0)\\
\mathit{testProb1}\ n = \mathit{quickCheck}\ \$\ \mathit{forAll}\ \mathit{genDouble}\ \mathit{check}\\
\quad \mathbf{where}\ \mathit{check} = \lambda x \rightarrow (\mathit{abs}\ ((1\ /\ x) - (\mathit{inv}\ x\ n + 1))) > \mathit{abs}\ ((1\ /\ x) - (\mathit{inv}\ x\ n))
\end{array}
$$

Problema 2

$$
\begin{array}{l}
\mathit{wc\_w\_final} :: [\mathit{Char}] \rightarrow \mathit{Int}\\
\mathit{wc\_w\_final} = \mathit{wrapper} \cdot \mathit{worker}\\
\mathit{wrapper} = \pi_2\\
\mathit{worker} = \mathit{cataList}\ \$\ [a, b]\\
\quad \mathbf{where}\\
\qquad a = \langle \mathit{true}, \underline{0} \rangle\\
\qquad b = \langle \mathit{sep} \cdot \pi_1, \mathit{cond}\ (\widehat{(\wedge)} \cdot (\neg \cdot \mathit{sep} \times \pi_1))\ (\mathsf{succ}\ \cdot \pi_2 \cdot \pi_2)\ (\pi_2 \cdot \pi_2) \rangle\\
\qquad \mathit{sep}\ c = c \equiv \texttt{'\ \ '} \vee c \equiv \texttt{'\textbackslash n'} \vee c \equiv \texttt{'\textbackslash t'}
\end{array}
$$

De modo a implementar o mecanismo de *QuickCheck* foi necessário criar a função **check** que compara o resultado da função *wc_w* (fornecida pelo professor) e a função *wc_w_final* criada por nós.
A função *check* recebe uma string como argumento, mas o *QuickCheck* tem a capacidade de gerar uma string aleatória, removendo assim a necessidade de passar um argumento.

$$
\begin{array}{l}
\mathit{check}\ s = \mathit{toInteger}\ (\mathit{wc\_w}\ s) \equiv \mathit{toInteger}\ (\mathit{wc\_w\_final}\ s)\\
\mathit{testProb2} = \mathit{quickCheck}\ \mathit{check}
\end{array}
$$

Problema 3

$$
\begin{array}{l}
\mathit{inB\_tree} = [\underline{\mathit{Nil}}, \widehat{\mathit{Block}}]\\
\mathit{outB\_tree}\ \mathit{Nil} = i_1\ ()\\
\mathit{outB\_tree}\ (\mathit{Block}\ a\ b) = i_2\ (a, b)\\
\mathit{recB\_tree}\ f = \mathit{baseB\_tree}\ \mathit{id}\ f\\
\mathit{baseB\_tree}\ g\ f = \mathit{id} + (f \times (\mathsf{map}\ \ (g \times f)))\\
\mathit{cataB\_tree}\ g = g \cdot (\mathit{recB\_tree}\ (\mathit{cataB\_tree}\ g)) \cdot \mathit{outB\_tree}\\
\mathit{anaB\_tree}\ g = \mathit{inB\_tree} \cdot (\mathit{recB\_tree}\ (\mathit{anaB\_tree}\ g)) \cdot g\\
\mathit{hyloB\_tree}\ f\ g = \mathit{cataB\_tree}\ f \cdot \mathit{anaB\_tree}\ g\\
\mathbf{instance}\ \mathit{Functor}\ \mathsf{B\text{-}tree}\\
\quad \mathbf{where}\ \mathsf{fmap}\ f = \mathit{cataB\_tree}\ (\mathit{inB\_tree} \cdot \mathit{baseB\_tree}\ f\ \mathit{id})\\
\mathit{inordB\_tree} = \mathit{cataB\_tree}\ \mathit{inordB}\\
\mathit{inordB} = [\mathit{nil}, \mathit{join}]\\
\quad \mathbf{where}\ \mathit{join} = \mathsf{conc} \cdot (\mathit{id} \times (\mathit{foldr}\ (+\!\!+)\ [\,]) \cdot (\mathsf{map}\ \ \mathit{cons}))\\
\mathit{largestBlock} = \mathit{cataB\_tree}\ \mathit{largestBlockAux}\\
\mathit{largestBlockAux} = [\underline{0}, \mathit{largest}]\\
\quad \mathbf{where}\ \mathit{largest}\ (x, \mathit{xs}) = \mathit{max}\ x\ (\mathit{max}\ (\mathsf{length}\ \ \mathit{xs})\ (\mathit{maximum}\ (\pi_2\ (\mathit{unzip}\ \mathit{xs}))))\\
\mathit{mirrorB\_tree} = \mathit{anaB\_tree}\ ((\mathit{id} + \mathit{mirrorB\_treeAux}) \cdot \mathit{outB\_tree})\\
\mathit{mirrorB\_treeAux}\ (x, \mathit{xs}) = (\pi_2\ (\mathit{last}\ \mathit{xs}), \mathit{reverse}\ (\mathit{mirrorAux}\ (x, \mathit{reverse}\ \widehat{\mathit{zip}}\ ((\mathit{reverse} \times \mathit{id})\ (\mathit{unzip}\ \mathit{xs})))))\\
\mathit{mirrorAux}\ (x, (a, b) : \mathit{xs}) = (a, x) : \mathit{xs}\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ [\,] \quad = i_1\ ()\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ [h] = i_2\ ([\,], [(h, [\,])])\\
\mathit{lsplitB\_tree}\ (x : y : t)
\end{array}
$$

$\quad | \; x > y = \textbf{let} \; (l1, l2, l3) = splitB\_tree \; (\widehat{(\wedge)} \cdot \langle >y, <x \rangle) \; (>y) \; t \; \textbf{in} \; i_2 \; (l1, (y, l2) : [(x, l3)])$
$\quad | \; otherwise = \textbf{let} \; (l1, l2, l3) = splitB\_tree \; (\widehat{(\wedge)} \cdot \langle >x, <y \rangle) \; (>x) \; t \; \textbf{in} \; i_2 \; (l1, (x, l2) : [(y, l3)])$

$splitB\_tree :: (a \to Bool) \to (a \to Bool) \to [a] \to ([a], [a], [a])$
$splitB\_tree \; \pi_1 \; \pi_2 \; [\,] = ([\,], [\,], [\,])$
$splitB\_tree \; \pi_1 \; \pi_2 \; (h : t)$
$\quad | \; \pi_1 \; h = \textbf{let} \; (s, m, l) = splitB\_tree \; \pi_1 \; \pi_2 \; t \; \textbf{in} \; (s, h : m, l)$
$\quad | \; \pi_2 \; h = \textbf{let} \; (s, m, l) = splitB\_tree \; \pi_1 \; \pi_2 \; t \; \textbf{in} \; (s, m, h : l)$
$\quad | \; otherwise = \textbf{let} \; (s, m, l) = splitB\_tree \; \pi_1 \; \pi_2 \; t \; \textbf{in} \; (h : s, m, l)$

$qSortB\_tree :: Ord \; a \Rightarrow [a] \to [a]$
$qSortB\_tree = hyloB\_tree \; inordB \; lsplitB\_tree$

$dotB\_tree :: Show \; a \Rightarrow \mathsf{B\text{-}tree} \; a \to \mathsf{IO} \; ExitCode$
$dotB\_tree = dotpict \cdot bmap \; nothing \; (Just \cdot show) \cdot cB\_tree2Exp$

$cB\_tree2Exp = cataB\_tree \; \$ \; [nul, rest]$
$\quad \textbf{where}$
$\quad \quad nul = \underline{(Var \; \texttt{"nil"})}$
$\quad \quad rest = \widehat{Term} \cdot \langle (\mathsf{map} \; \pi_1) \cdot \pi_2, cons \cdot \langle \pi_1, (\mathsf{map} \; \pi_2) \cdot \pi_2 \rangle \rangle$

Problema 4

$$[\![ga \; gb]\!]_A = inA \cdot (id + [\![ga \; gb]\!]_A \times [\![ga \; gb]\!]_B) \cdot ga$$
$$[\![ga \; gb]\!]_B = inB \cdot (id + [\![ga \; gb]\!]_A) \cdot gb$$

$generateAlgae = [\![ga \; gb]\!]_A$
$ga \; 0 = i_1 \; ()$
$ga \; n = i_2 \; (n - 1, n - 1)$
$gb \; 0 = i_1 \; ()$
$gb \; n = i_2 \; (n - 1)$
$showAlgae = (\!| l \; r |\!)_A$
$\quad \textbf{where}$
$\quad \quad l = [\underline{\texttt{"A"}}, \mathsf{conc}]$
$\quad \quad r = [\underline{\texttt{"B"}}, id]$

De modo a implementar o mecanismo de *QuickCheck* foi necessário gerar um **Int**. Para este efeito utilizamos a propriedade *Gen* da biblioteca *QuickCheck*, na qual decidimos restringir o valor do mesmo entre 0 e 10, de modo a evitar representações de *Algaes* com demasiados nodos.
No enunciado é pedido para verificar a seguinte propriedade:

$$\mathsf{length} \; \cdot showAlgae \cdot generateAlgae = fib \cdot \mathsf{succ}$$

Assim sendo, calculamos o comprimento da *Algae* gerada aleatoriamente pelo nosso *QuickCheck* e comparamos com o sucessor da série de Fibonacci. Caso ambos os valores sejam iguais passa no teste do *QuickCheck*, iterando para o resto dos valores gerados aleatoriamente.

$genInt :: Gen \; (Int)$
$genInt = Test.QuickCheck.choose \; (0, 10)$

$checkAlgae \; n = a \equiv f$
$\quad \textbf{where}$
$\quad \quad a = toInteger \; \$ \; \mathsf{length} \; (showAlgae \; (generateAlgae \; n))$
$\quad \quad f = fib \; \$ \; toInteger \; (\mathsf{succ} \; n)$

$testProb4 = quickCheck \; \$ \; forAll \; genInt \; checkAlgae$

Problema 5

$$
\begin{array}{l}
permuta\ [\,] = return\ [\,] \\
permuta\ l = \mathbf{do}\ \{ \\
\quad (h, t) \leftarrow getR\ l; \\
\quad x \leftarrow permuta\ t; \\
\quad return\ (h : x) \\
\quad \}
\end{array}
$$

De modo a ser possível testar a função **eliminatoria** utilizamos o exemplo fornecido, transformando-o numa *LTree*.
Assim sendo, após correr a mesma utilizando como argumento a *LTree* previamente criada, pudemos verificar que as percentagens são identicas às do enunciado, provando assim que a função está corretamente implementada.

$$
\begin{array}{l}
eliminatoria\ (Leaf\ x) = return\ x \\
eliminatoria\ (Fork\ (x, y)) = \mathbf{do}\ \{ \\
\quad v \leftarrow eliminatoria\ x; \\
\quad z \leftarrow eliminatoria\ y; \\
\quad jogo\ (v, z) \\
\quad \} \\
listaEquipas = Fork\ (\\
\quad Fork\ (\\
\quad\quad Fork\ (\\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Sporting"}), Leaf\ (\texttt{"Chaves"})), \\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"P.Ferreira"}), Leaf\ (\texttt{"Benfica"})) \\
\quad\quad\quad) \\
\quad\quad , Fork\ (\\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Porto"}), Leaf\ (\texttt{"Braga"})), \\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Setubal"}), Leaf\ (\texttt{"Feirense"})) \\
\quad\quad\quad) \\
\quad\quad) \\
\quad , Fork\ (\\
\quad\quad Fork\ (\\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Guimaraes"}), Leaf\ (\texttt{"Belenenses"})), \\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Moreirense"}), Leaf\ (\texttt{"Maritimo"})) \\
\quad\quad\quad) \\
\quad\quad , Fork\ (\\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Arouca"}), Leaf\ (\texttt{"Estoril"})), \\
\quad\quad\quad Fork\ (Leaf\ (\texttt{"Rio Ave"}), Leaf\ (\texttt{"Nacional"})) \\
\quad\quad\quad) \\
\quad\quad) \\
\quad)
\end{array}
$$

Índice