

# Cálculo de Programas Trabalho Prático MiEI+LCC — 2018/19

Departamento de Informática  
Universidade do Minho

Junho de 2019

**Grupo nr.** 43

a84802	João Nuno Cardoso Goncalves de Abreu
a85370	Hugo Fernandes Matias
a84240	Jorge Manuel Loureiro Vieira

## 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 à programação funcional em **Haskell**. Assim, o presente trabalho prático coloca os alunos perante problemas concretos que deverão ser implementados em **Haskell**. Há ainda um outro objectivo: o de ensinar a documentar programas, validá-los, 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**” [1], cujo princípio base é o seguinte:

*Um programa e a sua documentação devem coincidir.*

Por outras palavras, o código fonte e a documentação de um programa deverão estar no mesmo ficheiro.

O ficheiro `cp1819t.pdf` que está a ler é já um exemplo de **programação literária**: foi gerado a partir do texto fonte `cp1819t.lhs`<sup>1</sup> que encontrará no **material pedagógico** desta disciplina descompactando o ficheiro `cp1819t.zip` e executando

```
$ lhs2TeX cp1819t.lhs > cp1819t.tex
$ pdflatex cp1819t
```

em que **lhs2tex** é um pre-processor que faz “pretty printing” de código Haskell em **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X** e que deve desde já instalar executando

```
$ cabal install lhs2tex
```

Por outro lado, o mesmo ficheiro `cp1819t.lhs` é executável e contém o “kit” básico, escrito em **Haskell**, para realizar o trabalho. Basta executar

```
$ ghci cp1819t.lhs
```

---

<sup>1</sup>O suffixo ‘lhs’ quer dizer *literate Haskell*.

Abra o ficheiro `cp1819t.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 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 **D** com as 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 cp1819t.aux
$ makeindex cp1819t.idx
```

e recompilar o texto como acima se indicou. Dever-se-á ainda instalar o utilitário **QuickCheck**, que ajuda a validar programas em **Haskell** e a biblioteca **Gloss** para geração de gráficos 2D:

```
$ cabal install QuickCheck gloss
```

Para testar uma propriedade **QuickCheck** *prop*, basta invocá-la com o comando:

```
> quickCheck prop
+++ OK, passed 100 tests.
```

Qualquer programador tem, na vida real, de ler e analisar (muito!) código escrito por outros. No anexo **C** disponibiliza-se algum código **Haskell** relativo aos problemas que se seguem. Esse anexo deverá ser consultado e analisado à medida que isso for necessário.

### Problema 1

Um compilador é um programa que traduz uma linguagem dita de *alto nível* numa linguagem (dita de *baixo nível*) que seja executável por uma máquina. Por exemplo, o **GCC** compila C/C++ em código objecto que corre numa variedade de arquitecturas.

Compiladores são normalmente programas complexos. Constan essencialmente de duas partes: o *analisador sintático* que lê o texto de entrada (o programa *fonte* a compilar) e cria uma sua representação interna, estruturada em árvore; e o *gerador de código* que converte essa representação interna em código executável. Note-se que tal representação intermédia pode ser usada para outros fins, por exemplo, para gerar uma listagem de qualidade (*pretty print*) do programa fonte.

O projecto de compiladores é um assunto complexo que será assunto de outras disciplinas. Neste trabalho pretende-se apenas fazer uma introdução ao assunto, mostrando como tais programas se podem construir funcionalmente à custa de cata/ana/hilo-morfismos da linguagem em causa.

Para cumprirmos o nosso objectivo, a linguagem desta questão terá que ser, naturalmente, muito simples: escolheu-se a das expressões aritméticas com inteiros, *eg.*  $1+2$ ,  $3*(4+5)$  etc. Como representação interna adopta-se o seguinte tipo polinomial, igualmente simples:

```
data Expr = Num Int | Bop Expr Op Expr
data Op = Op String
```

1. Escreva as definições dos {cata, ana e hilo}-morfismos deste tipo de dados segundo o método ensinado nesta disciplina (recorde módulos como *eg.* `BTree` etc).

2. Como aplicação do módulo desenvolvido no ponto 1, defina como  $\{\text{cata}, \text{ana ou hilo}\}$ -morfismo a função seguinte:

- $\text{calcula} :: \text{Expr} \rightarrow \text{Int}$  que calcula o valor de uma expressão;

**Propriedade QuickCheck 1** O valor zero é um elemento neutro da adição.

```
prop_neutro1 :: Expr → Bool
prop_neutro1 = calcula · addZero ≡ calcula where
  addZero e = Bop (Num 0) (Op "+") e
prop_neutro2 :: Expr → Bool
prop_neutro2 = calcula · addZero ≡ calcula where
  addZero e = Bop e (Op "+") (Num 0)
```

**Propriedade QuickCheck 2** As operações de soma e multiplicação são comutativas.

```
prop_comuta = calcula · mirror ≡ calcula where
  mirror = cataExpr [Num, g2]
  g2 =  $\widehat{\widehat{\text{Bop}}} \cdot (\text{swap} \times \text{id}) \cdot \text{assocl} \cdot (\text{id} \times \text{swap})$ 
```

3. Defina como  $\{\text{cata}, \text{ana ou hilo}\}$ -morfismos as funções

- $\text{compile} :: \text{String} \rightarrow \text{Codigo}$  - trata-se do compilador propriamente dito. Deverá ser gerado código posfixo para uma máquina elementar de **stack**. O tipo *Codigo* pode ser definido à escolha. Dão-se a seguir exemplos de comportamentos aceitáveis para esta função:

```
Tp4> compile "2+4"
["PUSH 2", "PUSH 4", "ADD"]
Tp4> compile "3*(2+4)"
["PUSH 3", "PUSH 2", "PUSH 4", "ADD", "MUL"]
Tp4> compile "(3*2)+4"
["PUSH 3", "PUSH 2", "MUL", "PUSH 4", "ADD"]
Tp4>
```

- $\text{show}' :: \text{Expr} \rightarrow \text{String}$  - gera a representação textual de uma *Expr* pode encarar-se como o *pretty printer* associado ao nosso compilador

**Propriedade QuickCheck 3** Em anexo, é fornecido o código da função *readExp*, que é “inversa” da função *show'*, tal como a propriedade seguinte descreve:

```
prop_inv :: Expr → Bool
prop_inv =  $\pi_1 \cdot \text{head} \cdot \text{readExp} \cdot \text{show}' \equiv \text{id}$ 
```

**Valorização** Em anexo é apresentado código **Haskell** que permite declarar *Expr* como instância da classe *Read*. Neste contexto, *read* pode ser vista como o analisador sintático do nosso minúsculo compilador de expressões aritméticas.

Analise o código apresentado, corra-o e escreva no seu relatório uma explicação **breve** do seu funcionamento, que deverá saber defender aquando da apresentação oral do relatório.

Exprima ainda o analisador sintático *readExp* como um anamorfismo.

## Problema 2

Pretende-se neste problema definir uma linguagem gráfica “brinquedo” a duas dimensões (2D) capaz de especificar e desenhar agregações de caixas que contêm informação textual. Vamos designar essa linguagem por *L2D* e vamos defini-la como um tipo em **Haskell**:

```
type L2D = X Caixa Tipo
```

onde *X* é a estrutura de dados



Figura 1: Caixa simples e caixa composta.

**data**  $X \ a \ b = \text{Unid } a \mid \text{Comp } b \ (X \ a \ b) \ (X \ a \ b)$  **deriving** *Show*

e onde:

**type**  $\text{Caixa} = ((\text{Int}, \text{Int}), (\text{Texto}, \text{G.Color}))$   
**type**  $\text{Texto} = \text{String}$

Assim, cada caixa de texto é especificada pela sua largura, altura, o seu texto e a sua cor.<sup>2</sup> Por exemplo,

$((200, 200), (\text{"Caixa azul"}, \text{col\_blue}))$

designa a caixa da esquerda da figura 1.

O que a linguagem *L2D* faz é agregar tais caixas tipográficas umas com as outras segundo padrões especificados por vários “tipos”, a saber,

**data**  $\text{Tipo} = V \mid Vd \mid Ve \mid H \mid Ht \mid Hb$

com o seguinte significado:

- $V$  - agregação vertical alinhada ao centro
- $Vd$  - agregação vertical justificada à direita
- $Ve$  - agregação vertical justificada à esquerda
- $H$  - agregação horizontal alinhada ao centro
- $Hb$  - agregação horizontal alinhada pela base
- $Ht$  - agregação horizontal alinhada pelo topo

Como *L2D* instancia o parâmetro  $b$  de  $X$  com  $\text{Tipo}$ , é fácil de ver que cada “frase” da linguagem *L2D* é representada por uma árvore binária em que cada nó indica qual o tipo de agregação a aplicar às suas duas sub-árvores. Por exemplo, a frase

$\text{ex2} = \text{Comp } Hb \ (\text{Unid } ((100, 200), (\text{"A"}, \text{col\_blue})))$   
 $\quad \quad (\text{Unid } ((50, 50), (\text{"B"}, \text{col\_green})))$

deverá corresponder à imagem da direita da figura 1. E poder-se-á ir tão longe quando a linguagem o permita. Por exemplo, pense na estrutura da frase que representa o *layout* da figura 2.

É importante notar que cada “caixa” não dispõe informação relativa ao seu posicionamento final na figura. De facto, é a posição relativa que deve ocupar face às restantes caixas que irá determinar a sua posição final. Este é um dos objectivos deste trabalho: *calcular o posicionamento absoluto de cada uma das caixas por forma a respeitar as restrições impostas pelas diversas agregações*. Para isso vamos considerar um tipo de dados que comporta a informação de todas as caixas devidamente posicionadas (i.e. com a informação adicional da origem onde a caixa deve ser colocada).

<sup>2</sup>Pode relacionar *Caixa* com as caixas de texto usadas nos jornais ou com *frames* da linguagem HTML usada na Internet.



Figura 2: *Layout* feito de várias caixas coloridas.

```
type Fig = [(Origem, Caixa)]
type Origem = (Float, Float)
```

A informação mais relevante deste tipo é a referente à lista de “caixas posicionadas” (tipo  $(Origem, Caixa)$ ). Regista-se aí a origem da caixa que, com a informação da sua altura e comprimento, permite definir todos os seus pontos (consideramos as caixas sempre paralelas aos eixos).

1. Forneça a definição da função *calc\_origems*, que calcula as coordenadas iniciais das caixas no plano:

$$calc\_origems :: (L2D, Origem) \rightarrow X (Caixa, Origem) ()$$

2. Forneça agora a definição da função *agrup\_caixas*, que agrupa todas as caixas e respectivas origens numa só lista:

$$agrup\_caixas :: X (Caixa, Origem) () \rightarrow Fig$$

Um segundo problema neste projecto é *descobrir como visualizar a informação gráfica calculada por desenho*. A nossa estratégia para superar o problema baseia-se na biblioteca **Gloss**, que permite a geração de gráficos 2D. Para tal disponibiliza-se a função

$$crCaixa :: Origem \rightarrow Float \rightarrow Float \rightarrow String \rightarrow G.Color \rightarrow G.Picture$$

que cria um rectângulo com base numa coordenada, um valor para a largura, um valor para a altura, um texto que irá servir de etiqueta, e a cor pretendida. Disponibiliza-se também a função

$$display :: G.Picture \rightarrow IO ()$$

que dado um valor do tipo *G.picture* abre uma janela com esse valor desenhado. O objectivo final deste exercício é implementar então uma função

$$mostra\_caixas :: (L2D, Origem) \rightarrow IO ()$$

que dada uma frase da linguagem *L2D* e coordenadas iniciais apresenta o respectivo desenho no ecrã.

**Sugestão:** Use a função *G.pictures* disponibilizada na biblioteca **Gloss**.

## Problema 3

Nesta disciplina estudou-se como fazer **programação dinâmica** por cálculo, recorrendo à lei de recursividade mútua.<sup>3</sup>

Para o caso de funções sobre os números naturais ( $\mathbb{N}_0$ , com functor  $F X = 1 + X$ ) é fácil derivar-se da lei que foi estudada uma *regra de algibeira* que se pode ensinar a programadores que não tenham estudado **Cálculo de Programas**. Apresenta-se de seguida essa regra, tomando como exemplo o cálculo do ciclo-for que implementa a função de Fibonacci, recordar o sistema

$$\begin{aligned}fib\ 0 &= 1 \\ fib\ (n + 1) &= f\ n \\ f\ 0 &= 1 \\ f\ (n + 1) &= fib\ n + f\ n\end{aligned}$$

Obter-se-á de imediato

$$\begin{aligned}fib' &= \pi_1 \cdot \text{for loop init where} \\ loop\ (fib, f) &= (f, fib + f) \\ init &= (1, 1)\end{aligned}$$

usando as regras seguintes:

- O corpo do ciclo *loop* terá tantos argumentos quanto o número de funções mutuamente recursivas.
- Para as variáveis escolhem-se os próprios nomes das funções, pela ordem que se achar conveniente.<sup>4</sup>
- Para os resultados vão-se buscar as expressões respectivas, retirando a variável  $n$ .
- Em *init* colecionam-se os resultados dos casos de base das funções, pela mesma ordem.

Mais um exemplo, envolvendo polinómios no segundo grau a  $x^2 + bx + c$  em  $\mathbb{N}_0$ . Seguindo o método estudado nas aulas<sup>5</sup>, de  $f\ x = ax^2 + bx + c$  derivam-se duas funções mutuamente recursivas:

$$\begin{aligned}f\ 0 &= c \\ f\ (n + 1) &= f\ n + k\ n \\ k\ 0 &= a + b \\ k\ (n + 1) &= k\ n + 2\ a\end{aligned}$$

Seguindo a regra acima, calcula-se de imediato a seguinte implementação, em Haskell:

$$\begin{aligned}f'\ a\ b\ c &= \pi_1 \cdot \text{for loop init where} \\ loop\ (f, k) &= (f + k, k + 2 * a) \\ init &= (c, a + b)\end{aligned}$$

Qual é o assunto desta questão, então? Considerem fórmula que dá a série de Taylor da função coseno:

$$\cos x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i)!} x^{2i}$$

Pretende-se o ciclo-for que implementa a função  $\cos' x\ n$  que dá o valor dessa série tomando  $i$  até  $n$  inclusivé:

$$\cos' x = \dots \text{for loop init where } \dots$$

**Sugestão:** Começar por estudar muito bem o processo de cálculo dado no anexo B para o problema (semelhante) da função exponencial.

**Propriedade QuickCheck 4** Testes de que  $\cos' x$  calcula bem o coseno de  $\pi$  e o coseno de  $\pi / 2$ :

$$\begin{aligned}prop\_cos1\ n = n \geq 10 &\Rightarrow abs\ (\cos\ \pi - \cos'\ \pi\ n) < 0.001 \\ prop\_cos2\ n = n \geq 10 &\Rightarrow abs\ (\cos\ (\pi / 2) - \cos'\ (\pi / 2)\ n) < 0.001\end{aligned}$$

<sup>3</sup>Lei (3.94) em [2], página 98.

<sup>4</sup>Podem obviamente usar-se outros símbolos, mas numa primeiraleitura dá jeito usarem-se tais nomes.

<sup>5</sup>Secção 3.17 de [2].

**Valorização** Transliterar *cos'* para a linguagem C; compilar e testar o código. Conseguia, por intuição apenas, chegar a esta função?

## Problema 4

Pretende-se nesta questão desenvolver uma biblioteca de funções para manipular *sistemas de ficheiros* genéricos. Um sistema de ficheiros será visto como uma associação de *nomes* a ficheiros ou *directorias*. Estas últimas serão vistas como sub-sistemas de ficheiros e assim recursivamente. Assumindo que *a* é o tipo dos identificadores dos ficheiros e directorias, e que *b* é o tipo do conteúdo dos ficheiros, podemos definir um tipo indutivo de dados para representar sistemas de ficheiros da seguinte forma:

```
data FS a b = FS [(a, Node a b)] deriving (Eq, Show)
data Node a b = File b | Dir (FS a b) deriving (Eq, Show)
```

Um caminho (*path*) neste sistema de ficheiros pode ser representado pelo seguinte tipo de dados:

```
type Path a = [a]
```

Assumindo estes tipos de dados, o seguinte termo

```
FS [("f1", File "01a"),
    ("d1", Dir (FS [("f2", File "01e"),
                    ("f3", File "01e")
                    ]))
    ]
```

representará um sistema de ficheiros em cuja raiz temos um ficheiro chamado *f1* com conteúdo "01a" e uma directoria chamada "d1" constituída por dois ficheiros, um chamado "f2" e outro chamado "f3", ambos com conteúdo "01e". Neste caso, tanto o tipo dos identificadores como o tipo do conteúdo dos ficheiros é *String*. No caso geral, o conteúdo de um ficheiro é arbitrário: pode ser um binário, um texto, uma colecção de dados, etc.

A definição das usuais funções *inFS* e *recFS* para este tipo é a seguinte:

```
inFS = FS · map (id × inNode)
inNode = [File, Dir]
recFS f = baseFS id id f
```

Suponha que se pretende definir como um *catamorfismo* a função que conta o número de ficheiros existentes num sistema de ficheiros. Uma possível definição para esta função seria:

```
conta :: FS a b → Int
conta = cataFS (sum · map ([1, id] · π₂))
```

O que é para fazer:

1. Definir as funções *outFS*, *baseFS*, *cataFS*, *anaFS* e *hyloFS*.
2. Apresentar, no relatório, o diagrama de *cataFS*.
3. Definir as seguintes funções para manipulação de sistemas de ficheiros usando, obrigatoriamente, catamorfismos, anamorfismos ou hilomorfismos:
  - (a) Verificação da integridade do sistema de ficheiros (i.e. verificar que não existem identificadores repetidos dentro da mesma directoria).

```
check :: FS a b → Bool
```

**Propriedade QuickCheck 5** A integridade de um sistema de ficheiros não depende da ordem em que os últimos são listados na sua directoria:

```
prop_check :: FS String String → Bool
prop_check = check · (cataFS (inFS · reverse)) ≡ check
```

- (b) Recolha do conteúdo de todos os ficheiros num arquivo indexado pelo *path*.

$tar :: FS\ a\ b \rightarrow [(Path\ a,\ b)]$

**Propriedade QuickCheck 6** O número de ficheiros no sistema deve ser igual ao número de ficheiros listados pela função *tar*.

$prop\_tar :: FS\ String\ String \rightarrow Bool$   
 $prop\_tar = length \cdot tar \equiv conta$

- (c) Transformação de um arquivo com o conteúdo dos ficheiros indexado pelo *path* num sistema de ficheiros.

$untar :: [(Path\ a,\ b)] \rightarrow FS\ a\ b$

**Sugestão:** Use a função *joinDupDirs* para juntar directorias que estejam na mesma pasta e que possuam o mesmo identificador.

**Propriedade QuickCheck 7** A composição *tar* · *untar* preserva o número de ficheiros no sistema.

$prop\_untar :: [(Path\ String,\ String)] \rightarrow Property$   
 $prop\_untar = validPaths \Rightarrow ((length \cdot tar \cdot untar) \equiv length)$   
 $validPaths :: [(Path\ String,\ String)] \rightarrow Bool$   
 $validPaths = (\equiv 0) \cdot length \cdot (filter\ (\lambda(a,\ -) \rightarrow length\ a \equiv 0))$

- (d) Localização de todos os *paths* onde existe um determinado ficheiro.

$find :: a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow [Path\ a]$

**Propriedade QuickCheck 8** A composição *tar* · *untar* preserva todos os ficheiros no sistema.

$prop\_find :: String \rightarrow FS\ String\ String \rightarrow Bool$   
 $prop\_find = curry\ \$$   
 $length \cdot \widehat{find} \equiv length \cdot \widehat{find} \cdot (id \times (untar \cdot tar))$

- (e) Criação de um novo ficheiro num determinado *path*.

$new :: Path\ a \rightarrow b \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow FS\ a\ b$

**Propriedade QuickCheck 9** A adição de um ficheiro não existente no sistema não origina ficheiros duplicados.

$prop\_new :: ((Path\ String,\ String), FS\ String\ String) \rightarrow Property$   
 $prop\_new = ((validPath \wedge notDup) \wedge (check \cdot \pi_2)) \Rightarrow$   
 $(checkFiles \cdot \widehat{new})\ \mathbf{where}$   
 $validPath = (\neq 0) \cdot length \cdot \pi_1 \cdot \pi_1$   
 $notDup = \neg \cdot \widehat{elem} \cdot (\pi_1 \times ((fmap\ \pi_1) \cdot tar))$

**Questão:** Supondo-se que no código acima se substitui a propriedade *checkFiles* pela propriedade mais fraca *check*, será que a propriedade *prop\_new* ainda é válida? Justifique a sua resposta.

**Propriedade QuickCheck 10** A listagem de ficheiros logo após uma adição nunca poderá ser menor que a listagem de ficheiros antes dessa mesma adição.

$prop\_new2 :: ((Path\ String,\ String), FS\ String\ String) \rightarrow Property$   
 $prop\_new2 = validPath \Rightarrow ((length \cdot tar \cdot \pi_2) \leq (length \cdot tar \cdot \widehat{new}))\ \mathbf{where}$   
 $validPath = (\neq 0) \cdot length \cdot \pi_1 \cdot \pi_1$

- (f) Duplicação de um ficheiro.

$cp :: Path\ a \rightarrow Path\ a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow FS\ a\ b$

**Propriedade QuickCheck 11** A listagem de ficheiros com um dado nome não diminui após uma duplicação.

$prop\_cp :: ((Path\ String,\ Path\ String), FS\ String\ String) \rightarrow Bool$   
 $prop\_cp = length \cdot tar \cdot \pi_2 \leq length \cdot tar \cdot \widehat{cp}$





Figura 3: Exemplo de um sistema de ficheiros visualizado em Graphviz.

(g) Eliminação de um ficheiro.

$rm :: Path\ a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow FS\ a\ b$

**Sugestão:** Construir um anamorfismo  $nav :: (Path\ a, FS\ a\ b) \rightarrow FS\ a\ b$  que navegue por um sistema de ficheiros tendo como base o *path* dado como argumento.

**Propriedade QuickCheck 12** *Remover duas vezes o mesmo ficheiro tem o mesmo efeito que o remover apenas uma vez.*

$$prop\_rm :: (Path\ String, FS\ String\ String) \rightarrow Bool$$

$$prop\_rm = \widehat{rm} \cdot \langle \pi_1, \widehat{rm} \rangle \equiv \widehat{rm}$$

**Propriedade QuickCheck 13** *Adicionar um ficheiro e de seguida remover o mesmo não origina novos ficheiros no sistema.*

$$prop\_rm2 :: ((Path\ String, String), FS\ String\ String) \rightarrow Property$$

$$prop\_rm2 = validPath \Rightarrow ((length \cdot tar \cdot \widehat{rm} \cdot \langle \pi_1 \cdot \pi_1, \widehat{new} \rangle) \leq (length \cdot tar \cdot \pi_2)) \text{ where}$$

$$validPath = (\neq 0) \cdot length \cdot \pi_1 \cdot \pi_1$$

**Valorização** Definir uma função para visualizar em Graphviz a estrutura de um sistema de ficheiros. A Figura 3, por exemplo, apresenta a estrutura de um sistema com precisamente dois ficheiros dentro de uma directoria chamada "d1".

Para realizar este exercício será necessário apenas escrever o anamorfismo

$$cFS2Exp :: (a, FS\ a\ b) \rightarrow (Exp\ ()\ a)$$

que converte a estrutura de um sistema de ficheiros numa árvore de expressões descrita em Exp.hs. A função *dotFS* depois tratará de passar a estrutura do sistema de ficheiros para o visualizador.

# Anexos

## A Como exprimir cálculos e diagramas em LaTeX/lhs2tex

Estudar o texto fonte deste trabalho para obter o efeito:<sup>6</sup>

$$\begin{aligned}
 id &= \langle f, g \rangle \\
 &\equiv \{ \text{universal property} \} \\
 &\quad \left\{ \begin{array}{l} \pi_1 \cdot id = f \\ \pi_2 \cdot id = g \end{array} \right. \\
 &\equiv \{ \text{identity} \} \\
 &\quad \left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = f \\ \pi_2 = g \end{array} \right. \\
 &\square
 \end{aligned}$$

Os diagramas podem ser produzidos recorrendo à *package* L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X *xymatrix*, por exemplo:

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbb{N}_0 & \xleftarrow{\text{in}} & 1 + \mathbb{N}_0 \\
 \downarrow \langle g \rangle & & \downarrow id + \langle g \rangle \\
 B & \xleftarrow{g} & 1 + B
 \end{array}$$

## B Programação dinâmica por recursividade múltipla

Neste anexo dão-se os detalhes da resolução do Exercício 3.30 dos apontamentos da disciplina<sup>7</sup>, onde se pretende implementar um ciclo que implemente o cálculo da aproximação até  $i = n$  da função exponencial  $\exp x = e^x$  via série de Taylor:

$$\exp x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!} \quad (1)$$

Seja  $e\ x\ n = \sum_{i=0}^n \frac{x^i}{i!}$  a função que dá essa aproximação. É fácil de ver que  $e\ x\ 0 = 1$  e que  $e\ x\ (n+1) = e\ x\ n + \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}$ . Se definirmos  $h\ x\ n = \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}$  teremos  $e\ x$  e  $h\ x$  em recursividade mútua. Se repetirmos o processo para  $h\ x\ n$  etc obteremos no total três funções nessa mesma situação:

$$\begin{aligned}
 e\ x\ 0 &= 1 \\
 e\ x\ (n+1) &= h\ x\ n + e\ x\ n \\
 h\ x\ 0 &= x \\
 h\ x\ (n+1) &= x / (s\ n) * h\ x\ n \\
 s\ 0 &= 2 \\
 s\ (n+1) &= 1 + s\ n
 \end{aligned}$$

Segundo a *regra de algibeira* descrita na página 3 deste enunciado, ter-se-á, de imediato:

$$\begin{aligned}
 e'\ x &= prj \cdot \text{for loop init where} \\
 init &= (1, x, 2) \\
 loop\ (e, h, s) &= (h + e, x / s * h, 1 + s) \\
 prj\ (e, h, s) &= e
 \end{aligned}$$

<sup>6</sup>Exemplos tirados de [2].

<sup>7</sup>Cf. [2], página 102.

## C Código fornecido

### Problema 1

Tipos:

```
data Expr = Num Int
          | Bop Expr Op Expr deriving (Eq, Show)
data Op = Op String deriving (Eq, Show)
type Codigo = [String]
```

Functor de base:

```
baseExpr f g = id + (f × (g × g))
```

Instâncias:

```
instance Read Expr where
  readsPrec _ = readExp
```

Read para Exp's:

```
readOp :: String → [(Op, String)]
readOp input = do
  (x, y) ← lex input
  return ((Op x), y)

readNum :: ReadS Expr
readNum = (map (λ(x, y) → ((Num x), y))) · reads

readBinOp :: ReadS Expr
readBinOp = (map (λ((x, (y, z)), t) → ((Bop x y z), t))) ·
  ((readNum 'ou' (pcurvos readExp))
   'depois' (readOp 'depois' readExp))

readExp :: ReadS Expr
readExp = readBinOp 'ou' (
  readNum 'ou' (
    pcurvos readExp))
```

Combinadores:

```
depois :: (ReadS a) → (ReadS b) → ReadS (a, b)
depois _ _ [] = []
depois r1 r2 input = [((x, y), i2) | (x, i1) ← r1 input,
  (y, i2) ← r2 i1]

readSeq :: (ReadS a) → ReadS [a]
readSeq r input
  = case (r input) of
    [] → [([], input)]
    l → concat (map continua l)
    where continua (a, i) = map (c a) (readSeq r i)
      c x (xs, i) = ((x : xs), i)

ou :: (ReadS a) → (ReadS a) → ReadS a
ou r1 r2 input = (r1 input) ++ (r2 input)

senao :: (ReadS a) → (ReadS a) → ReadS a
senao r1 r2 input = case (r1 input) of
  [] → r2 input
  l → l

readConst :: String → ReadS String
readConst c = (filter ((≡ c) · π1)) · lex

pcurvos = parenthesis ' ( ' ' ) '
```

```

prectos = parenthesis ' [ ' ' ] '
chavetas = parenthesis ' { ' ' } '
parenthesis :: Char → Char → (ReadS a) → ReadS a
parenthesis _ _ _ [] = []
parenthesis ap pa r input
= do
  ((-, (x, -)), c) ← ((readConst [ap]) 'depois' (
    r 'depois' (
      readConst [pa]))) input
  return (x, c)

```

## Problema 2

Tipos:

```

type Fig = [(Origem, Caixa)]
type Origem = (Float, Float)

```

“Helpers”:

```

col_blue = G.azure
col_green = darkgreen
darkgreen = G.dark (G.dark G.green)

```

Exemplos:

```

ex1Caixas = G.display (G.InWindow "Problema 4" (400,400) (40,40)) G.white $
  crCaixa (0,0) 200 200 "Caixa azul" col_blue
ex2Caixas = G.display (G.InWindow "Problema 4" (400,400) (40,40)) G.white $
  caixasAndOrigin2Pict ((Comp Hb bbox gbox), (0.0,0.0)) where
    bbox = Unid ((100,200), ("A", col_blue))
    gbox = Unid ((50,50), ("B", col_green))
ex3Caixas = G.display (G.InWindow "Problema 4" (400,400) (40,40)) G.white mtest where
  mtest = caixasAndOrigin2Pict $ (Comp Hb (Comp Ve bot top) (Comp Ve gbox2 ybox2), (0.0,0.0))
  bbox1 = Unid ((100,200), ("A", col_blue))
  bbox2 = Unid ((150,200), ("E", col_blue))
  gbox1 = Unid ((50,50), ("B", col_green))
  gbox2 = Unid ((100,300), ("F", col_green))
  rbox1 = Unid ((300,50), ("C", G.red))
  rbox2 = Unid ((200,100), ("G", G.red))
  wbox1 = Unid ((450,200), ("", G.white))
  ybox1 = Unid ((100,200), ("D", G.yellow))
  ybox2 = Unid ((100,300), ("H", G.yellow))
  bot = Comp Hb wbox1 bbox2
  top = (Comp Ve (Comp Hb bbox1 gbox1) (Comp Hb rbox1 (Comp H ybox1 rbox2)))

```

A seguinte função cria uma caixa a partir dos seguintes parâmetros: origem, largura, altura, etiqueta e cor de preenchimento.

```

crCaixa :: Origem → Float → Float → String → G.Color → G.Picture
crCaixa (x,y) w h l c = G.Translate (x + (w / 2)) (y + (h / 2)) $ G.pictures [caixa, etiqueta] where
  caixa = G.color c (G.rectangleSolid w h)
  etiqueta = G.translate calc_trans_x calc_trans_y $
    G.Scale calc_scale calc_scale $ G.color G.black $ G.Text l
  calc_trans_x = -((fromIntegral (length l)) * calc_scale) / 2 * base_shift_x
  calc_trans_y = (-calc_scale / 2) * base_shift_y
  calc_scale = bscale * (min h w)
  bscale = 1 / 700

```

```
base_shift_y = 100
base_shift_x = 64
```

Função para visualizar resultados gráficos:

```
display = G.display (G.InWindow "Problema 4" (400,400) (40,40)) G.white
```

## Problema 4

Funções para gestão de sistemas de ficheiros:

```
concatFS = inFS ·  $\widehat{(\text{++})}$  · (outFS × outFS)
mkdir (x, y) = FS [(x, Dir y)]
mkfile (x, y) = FS [(x, File y)]
joinDupDirs :: (Eq a) ⇒ (FS a b) → (FS a b)
joinDupDirs = anaFS (prepOut · (id × proc) · prepIn) where
  prepIn = (id × (map (id × outFS))) · sls · (map distr) · outFS
  prepOut = (map undistr) ·  $\widehat{(\text{++})}$  · ((map i1) × (map i2)) · (id × (map (id × inFS)))
  proc = concat · (map joinDup) · groupByName
  sls = ⟨lefts, rights⟩
joinDup :: [(a, [b])] → [(a, [b])]
joinDup = cataList [nil, g] where g = return · ⟨π1 · π1, concat · (map π2) ·  $\widehat{(\text{·})}$ ⟩
createFSfromFile :: (Path a, b) → (FS a b)
createFSfromFile ([a], b) = mkfile (a, b)
createFSfromFile (a : as, b) = mkdir (a, createFSfromFile (as, b))
```

Funções auxiliares:

```
checkFiles :: (Eq a) ⇒ FS a b → Bool
checkFiles = cataFS ( $\widehat{(\text{·})}$  · ⟨f, g⟩) where
  f = nr · (fmap π1) · lefts · (fmap distr)
  g = and · rights · (fmap π2)
groupByName :: (Eq a) ⇒ [(a, [b])] → [[(a, [b])]]
groupByName = (groupBy (curry p)) where
  p =  $\widehat{(\text{·})}$  · (π1 × π1)
filterPath :: (Eq a) ⇒ Path a → [(Path a, b)] → [(Path a, b)]
filterPath = filter · (λp → λ(a, b) → p ≡ a)
```

Dados para testes:

- Sistema de ficheiros vazio:

```
efs = FS []
```

- Nível 0

```
f1 = FS [("f1", File "hello world")]
f2 = FS [("f2", File "more content")]
f00 = concatFS (f1, f2)
f01 = concatFS (f1, mkdir ("d1", efs))
f02 = mkdir ("d1", efs)
```

- Nível 1

```
f10 = mkdir ("d1", f00)
f11 = concatFS (mkdir ("d1", f00), mkdir ("d2", f00))
f12 = concatFS (mkdir ("d1", f00), mkdir ("d2", f01))
f13 = concatFS (mkdir ("d1", f00), mkdir ("d2", efs))
```

- Nível 2

```
f20 = mkdir ("d1", f10)
f21 = mkdir ("d1", f11)
f22 = mkdir ("d1", f12)
f23 = mkdir ("d1", f13)
f24 = concatFS (mkdir ("d1", f10), mkdir ("d2", f12))
```

- Sistemas de ficheiros inválidos:

```
ifs0 = concatFS (f1, f1)
ifs1 = concatFS (f1, mkdir ("f1", efs))
ifs2 = mkdir ("d1", ifs0)
ifs3 = mkdir ("d1", ifs1)
ifs4 = concatFS (mkdir ("d1", ifs1), mkdir ("d2", f12))
ifs5 = concatFS (mkdir ("d1", f1), mkdir ("d1", f2))
ifs6 = mkdir ("d1", ifs5)
ifs7 = concatFS (mkdir ("d1", f02), mkdir ("d1", f02))
```

Visualização em **Graphviz**:

```
dotFS :: FS String b → IO ExitCode
dotFS = dotpict · bmap "_" id · (cFS2Exp "root")
```

## Outras funções auxiliares

Lógicas:

```
infixr 0 ⇒
(⇒) :: (Testable prop) ⇒ (a → Bool) → (a → prop) → a → Property
p ⇒ f = λa → p a ⇒ f a

infixr 0 ⇔
(⇔) :: (a → Bool) → (a → Bool) → a → Property
p ⇔ f = λa → (p a ⇒ property (f a)) .&&. (f a ⇒ property (p a))

infixr 4 ≡
(≡) :: Eq b ⇒ (a → b) → (a → b) → (a → Bool)
f ≡ g = λa → f a ≡ g a

infixr 4 ≤
(≤) :: Ord b ⇒ (a → b) → (a → b) → (a → Bool)
f ≤ g = λa → f a ≤ g a

infixr 4 ∧
(∧) :: (a → Bool) → (a → Bool) → (a → Bool)
f ∧ g = λa → ((f a) ∧ (g a))
```

Compilação e execução dentro do interpretador:<sup>8</sup>

```
run = do { system "ghc cp1819t"; system "./cp1819t" }
```

## D Soluções dos alunos

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 ou tipos das funções dadas, mas pode ser adicionado texto e/ou outras funções auxiliares que sejam necessárias.

<sup>8</sup>Pode ser útil em testes envolvendo **Gloss**. Nesse caso, o teste em causa deve fazer parte de uma função *main*.

## Problema 1

$inExpr :: Int \rightarrow (Op, (Expr, Expr)) \rightarrow Expr$   
 $inExpr = [Num, ((result) \widehat{+} (flip Bop))]$   
 $outExpr :: Expr \rightarrow Int \rightarrow (Op, (Expr, Expr))$   
 $outExpr (Num a) = i_1 (a)$   
 $outExpr (Bop e_1 o e_2) = i_2 (o, (e_1, e_2))$   
 $recExpr f = baseExpr id f$   
 $cataExpr g = g \cdot (recExpr (cataExpr g)) \cdot outExpr$   
 $anaExpr g = inExpr \cdot (recExpr (anaExpr g)) \cdot g$   
 $hyloExpr h g = cataExpr h \cdot anaExpr g$   
 $calcula :: Expr \rightarrow Int$   
 $calcula = cataExpr [id, cond ((\equiv "+") \cdot getOp \cdot \pi_1) f g]$   
**where**  
 $f = \widehat{+} \cdot \pi_2$   
 $g = \widehat{*} \cdot \pi_2$

$$\begin{array}{ccc}
 Expr & \xleftarrow{\text{in}} & Int + (Op, (Expr, Expr)) \\
 \text{calcula} \downarrow & & \downarrow id + (f \times (calcula \times calcula)) \\
 Int & \xleftarrow{g} & Int + (Op, (Int, Int))
 \end{array}$$

$show' :: Expr \rightarrow String$   
 $show' = cataExpr [show, aux]$   
**where**  
 $aux ((Op o), (s1, s2)) = "(" ++ "(" ++ s1 ++ ")" ++ o ++ "(" ++ s2 ++ ")" ++ ")"$

$$\begin{array}{ccc}
 Expr & \xleftarrow{\text{in}} & Int + (Op, (Expr, Expr)) \\
 \text{show}' \downarrow & & \downarrow id + (f \times (show' \times show')) \\
 String & \xleftarrow{g} & Int + (Op, (String, String))
 \end{array}$$

$compile :: String \rightarrow Codigo$   
 $compile = cataExpr [f, cond ((\equiv "+") \cdot getOp \cdot \pi_1) g h] \cdot \pi_1 \cdot head \cdot readExp$   
**where**  
 $f = singl \cdot criaString$   
 $g = addSoma \cdot \widehat{+} \cdot \pi_2$   
 $h = addMul \cdot \widehat{*} \cdot \pi_2$

$$\begin{array}{ccc}
 Expr & \xleftarrow{\text{in}} & Int + (Op, (Expr, Expr)) \\
 \text{compile} \downarrow & & \downarrow id + (f \times (compile \times compile)) \\
 Codigo & \xleftarrow{g} & Int + (Op, (Codigo, Codigo))
 \end{array}$$

## Funções auxiliares Problema 1

```

result :: (b → b') → ((a → b) → (a → b'))
result = (·)

getOp :: Op → String
getOp (Op o) = o

criaString :: Int → String
criaString i = "PUSH " ++ show i

addSoma :: Codigo → Codigo
addSoma l = (++) (l, singl "ADD")

addMul :: Codigo → Codigo
addMul l = (++) (l, singl "MUL")

```

## Problema 2

```

inL2D :: a + (b, (X a b, X a b)) → X a b
inL2D = [Unid, ((result)^(Comp))]

outL2D :: X a b → a + (b, (X a b, X a b))
outL2D (Unid d) = i1 d
outL2D (Comp b x1 x2) = i2 (b, (x1, x2))

baseL2D f g = id + (f × (g × g))

recL2D f = baseL2D id f

cataL2D g = g · (recL2D (cataL2D g)) · outL2D

anaL2D g = inL2D · (recL2D (anaL2D g)) · g

collectLeafs :: X a b → [a]
collectLeafs = cataL2D [singl, (++) · π2]

dimen :: X Caixa Tipo → (Float, Float)
dimen = cataL2D [f, g]

where
  f :: Caixa → (Float, Float)
  f ((a1, a2), _) = (fromIntegral a1, fromIntegral a2)
  g :: (Tipo, ((Float, Float), (Float, Float))) → (Float, Float)
  g (t, ((x1, y1), (x2, y2))) = case t of
    V → (max x1 x2, y1 + y2)
    Vd → (max x1 x2, y1 + y2)
    Ve → (max x1 x2, y1 + y2)
    H → (x1 + x2, max y1 y2)
    Hb → (x1 + x2, max y1 y2)
    Ht → (x1 + x2, max y1 y2)

calcOrigins :: ((X Caixa Tipo), Origem) → X (Caixa, Origem) ()
calcOrigins (Unid d, o) = Unid (d, o)
calcOrigins (Comp b x1 x2, o) = Comp () (calcOrigins (x1, o)) (calcOrigins (x2, calc b o (dimen x1)))

agrupCaixas :: X (Caixa, Origem) () → Fig
agrupCaixas (Unid (c, o)) = [(o, c)]
agrupCaixas (Comp () x1 x2) = agrupCaixas x1 ++ agrupCaixas x2

calc :: Tipo → Origem → (Float, Float) → Origem
calc t (o1, o2) (dx, dy) = case t of
  V → (o1 + dx / 2, o2 + dy)
  Vd → (o1 + dx, o2 + dy)
  Ve → (o1, o2 + dy)
  H → (o1 + dx, o2 + dy / 2)
  Hb → (o1 + dx, o2)
  Ht → (o1 + dx, o2)

```



```

Ht → (o1 + dx, o2 + dy)
caixasAndOrigin2Pict :: (X Caixa Tipo, Origem) → G.Picture
caixasAndOrigin2Pict = G.Pictures · crCaixa2 · agrupCaixas · calcOrigins
mostraCaixas :: (L2D, Origem) → IO ()
mostraCaixas = display · caixasAndOrigin2Pict

```

### Funções Auxiliares Problema 3

```

crCaixa2 :: Fig → [G.Picture]
crCaixa2 [] = []
crCaixa2 ((o, ((x, y), (text, color))) : t) = crCaixa o (fromIntegral x) (fromIntegral y) text color : crCaixa2 t

```

### Problema 3

Solução:

```

cos' x = prj · for loop init where
  loop (coss, rec1, rec2, rec3) = (coss + rec1, rec1 * (-square (x) / rec2), rec2 + rec3, rec3 + 8)
  init = (1, -square (x) / 2, 12, 18)
  prj (coss, rec1, rec2, rec3) = coss

```

### Funções de recursividade

```

coss :: (Num a, Eq a, Floating a, Integral a) ⇒ a → a → a
coss x 0 = 1
coss x (n + 1) = (coss x n) + (rec1 x n)
rec1 :: (Num a, Eq a, Floating a, Integral a) ⇒ a → a → a
rec1 x 0 = -square (x) / 2
rec1 x (n + 1) = (rec1 x n) * (-square (x) / rec2 x n)
rec2 :: (Num a, Eq a, Floating a, Integral a) ⇒ a → a → a
rec2 x 0 = 12
rec2 x (n + 1) = (rec2 x n) + (rec3 x n)
rec3 :: (Num a, Eq a, Floating a, Integral a) ⇒ a → a → a
rec3 x 0 = 18
rec3 x (n + 1) = (rec3 x n) + 8

```

### Funções Auxiliares

```

square :: (Num a, Eq a, Floating a) ⇒ a → a
square num = num * num

```

### Problema 4

Triologia “ana-cata-hilo”:

```

outFS :: FS a b → [(a, b + (FS a b))]
outFS (FS []) = []
outFS (FS ((a, b) : t)) = (a, outNode b) : outFS (FS t)
outNode (File b) = i1 b
outNode (Dir (FS a)) = i2 (FS a)
baseFS f g h = map (f × (g + h))

```

$cataFS :: [(a, b + c)] \rightarrow c \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow c$   
 $cataFS\ g = g \cdot (recFS\ (cataFS\ g)) \cdot outFS$

$$\begin{array}{ccc}
 FS\ a\ b & \xleftarrow{\text{in}} & (a \times (b + FS\ a\ b))^* \\
 \downarrow \langle g \rangle & & \downarrow \text{map } (id \times (id + \langle g \rangle)) \\
 c & \xleftarrow{g} & (a \times (b + c))^*
 \end{array}$$

$anaFS :: (c \rightarrow [(a, b + c)]) \rightarrow c \rightarrow FS\ a\ b$   
 $anaFS\ g = inFS \cdot (recFS\ (anaFS\ g)) \cdot g$   
 $hyloFS\ g\ h = cataFS\ h \cdot anaFS\ g$

Outras funções pedidas:

$check :: (Eq\ a) \Rightarrow FS\ a\ b \rightarrow Bool$   
 $check = cataFS\ (\neg \cdot hasDuplicatesOrFalses \cdot \text{map } (id \times (fromRight\ True)))$   
**where**  
 $hasDuplicatesOrFalses :: (Eq\ a) \Rightarrow [(a, Bool)] \rightarrow Bool$   
 $hasDuplicatesOrFalses\ xs = \text{length } (nub\ xs) \neq \text{length } xs \vee \text{length } (filter\ (\equiv\ True)\ (\text{map } \pi_2\ xs)) \neq \text{length } xs$   
 $tar :: FS\ a\ b \rightarrow [(Path\ a, b)]$   
 $tar = cataFS\ (concat \cdot \text{map } f)$   
**where**  
 $f :: (a, b + [(Path\ a, b)]) \rightarrow [(Path\ a, b)]$   
 $f\ (a, (i_1\ x)) = [(singl\ a, x)]$   
 $f\ (a, (i_2\ x)) = addElementInPair\ x\ a$   
 $untar :: (Eq\ a) \Rightarrow [(Path\ a, b)] \rightarrow FS\ a\ b$   
 $untar = joinDupDirs \cdot anaFS\ (\text{map } f)$   
**where**  
 $f :: (Path\ a, b) \rightarrow (a, b + [(Path\ a, b)])$   
 $f\ ([a], b) = (a, i_1\ b)$   
 $f\ ((h : t), b) = (h, i_2\ [(t, b)])$   
 $find :: (Eq\ a) \Rightarrow a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow [Path\ a]$   
 $find\ a = cataFS\ ((filtraPaths\ a) \cdot concat \cdot (\text{map } f))$   
**where**  
 $f :: (Eq\ a) \Rightarrow (a, b + [Path\ a]) \rightarrow [Path\ a]$   
 $f\ (a, (i_1\ x)) = [singl\ a]$   
 $f\ (a, (i_2\ x)) = addElement\ x\ a$   
 $new :: (Eq\ a) \Rightarrow Path\ a \rightarrow b \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow FS\ a\ b$   
 $new = \perp$   
 $cp :: (Eq\ a) \Rightarrow Path\ a \rightarrow Path\ a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow FS\ a\ b$   
 $cp = \perp$   
 $rm :: (Eq\ a) \Rightarrow (Path\ a) \rightarrow (FS\ a\ b) \rightarrow FS\ a\ b$   
 $rm = \perp$   
 $auxJoin :: [(a, b + c), d] \rightarrow [(a, b + (d, c))]$   
 $auxJoin = \perp$   
 $cFS2Exp :: a \rightarrow FS\ a\ b \rightarrow (Exp\ ()\ a)$   
 $cFS2Exp = \perp$

## Funções auxiliares Problema 4

$addElementInPair :: [(a, b)] \rightarrow a \rightarrow [(a, b)]$   
 $addElementInPair\ [] = []$

```

addElementInPair ((a, b) : t) x = (x : a, b) : addElementInPair t x
addElement :: Eq a ⇒ [a] → a → [a]
addElement [] _ = []
addElement (a : t) x = (x : a) : addElement t x
filterPaths :: Eq a ⇒ a → [Path a] → [Path a]
filterPaths a = filter (elem a)

```

# Índice

LaTeX, [1](#)  
    lhs2TeX, [1](#)

Cálculo de Programas, [1](#), [2](#), [6](#)  
    Material Pedagógico, [1](#)

Combinador “pointfree”  
    cata, [10](#)  
    either, [3](#), [7](#), [13](#), [15](#)

Função  
     $\pi_1$ , [3](#), [6](#), [8–11](#), [13](#), [15](#)  
     $\pi_2$ , [7–10](#), [13](#), [15](#)  
    for, [6](#), [10](#), [16](#)  
    length, [8](#), [9](#), [12](#)  
    map, [7](#), [11](#), [13](#)  
    uncurry, [3](#), [8](#), [9](#), [13](#), [15](#), [16](#)

Functor, [2](#), [5](#), [6](#), [14](#)

GCC, [2](#)  
Graphviz, [9](#), [14](#)

Haskell, [1–3](#)  
    “Literate Haskell”, [1](#)  
    Gloss, [2](#), [5](#), [14](#)  
    interpretador  
        GHCi, [2](#)  
        QuickCheck, [2](#)

HTML, [4](#)

Números naturais ( $\mathbb{N}$ ), [6](#), [10](#)

Programação dinâmica, [6](#)  
Programação literária, [1](#)

Stack machine, [3](#)

U.Minho  
    Departamento de Informática, [1](#)

Utilitário  
    LaTeX  
        bibtex, [2](#)  
        makeindex, [2](#)

## Referências

- [1] D.E. Knuth. *Literate Programming*. CSLI Lecture Notes Number 27. Stanford University Center for the Study of Language and Information, Stanford, CA, USA, 1992.
- [2] J.N. Oliveira. *Program Design by Calculation*, 2018. Draft of textbook in preparation. viii+297 pages. Informatics Department, University of Minho.