



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

## **Cálculo de Programas**

### Trabalho Prático (2024/25)

Lic. em Ciências da Computação

#### **Grupo G15**

a108473 André Filipe Dourado Pinheiro  
a105532 Killian Alexandre Ferreira Oliveira  
a108398 Pedro Dong Mo

## Preâmbulo

Na UC de [Cálculo de Programas](#) pretende-se 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 cursos que têm esta disciplina, opta-se pela aplicação deste método à programação em [Haskell](#) (sem prejuízo da sua aplicação a outras linguagens funcionais). 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, a validá-los e a produzir textos técnico-científicos de qualidade.

Antes de abordarem os problemas propostos no trabalho, os grupos devem ler com atenção o anexo [A](#) onde encontrarão as instruções relativas ao *software* a instalar, etc.

Valoriza-se a escrita de *pouco* código que corresponda a soluções simples e elegantes que utilizem os combinadores de ordem superior estudados na disciplina.

## Problema 1

Esta questão aborda um problema que é conhecido pela designação '*Container With Most Water*' e que se formula facilmente através do exemplo da figura seguinte:



A figura mostra a sequência de números

$hghts = [1, 8, 6, 2, 5, 4, 8, 3, 7]$

representada sob a forma de um histograma. O que se pretende é obter a maior área rectangular delimitada por duas barras do histograma, área essa marcada a azul na figura. (A “metáfora” *container with most water* sugere que as barras seleccionadas delimitam um *container* com água.)

Pretende-se definida como um catamorfismo, anamorfismo ou hilomorfismo uma função em [Haskell](#)

$mostwater :: [Int] \rightarrow Int$

que deverá dar essa área. (No exemplo acima tem-se  $mostwater [1, 8, 6, 2, 5, 4, 8, 3, 7] = 49$ .) A resolução desta questão deverá ser acompanhada de diagramas elucidativos.



Figure 1: [RNN](#) vista como instância de um *accumulating map* [3].

## Problema 2

Um dos problemas prementes da Computação na actualidade é conseguir, por engenharia reversa, interpretar as redes neurais ([RN](#)) geradas artificialmente sob a forma de algoritmos compreensíveis por humanos.

Já foram dados passos que, nesse sentido, explicam vários padrões de [RNs](#) em termos de combinadores funcionais [3]. Em particular, já se mostrou como as [RNNs](#) (*Recurrent Neural Networks*) podem ser vistas como instâncias de *accumulating maps*, que em [Haskell](#) correspondem às funções [mapAccumR](#) e [mapAccumL](#), conforme o sentido em que a acumulação se verifica (cf. figura 1).

A [RNN](#) que a figura 1 mostra diz-se 'one-to-one' [1]. Há contudo padrões de [RNNs](#) mais gerais: por exemplo, o padrão 'many-to-one' que se mostra na figura 2 extraída de [1].

Se [mapAccumR](#) e [mapAccumL](#) juntam *maps* com *folds*, pretendemos agora combinadores que a isso acrescentem *filter*, por forma a seleccionar que etapas da computação geram ou não *outputs* — obtendo-se assim o efeito 'many-to-one'. Ter-se-á, para esse efeito:

$$\begin{aligned} \text{mapAccumRfilter} &:: ((a, s) \rightarrow \text{Bool}) \rightarrow ((a, s) \rightarrow (c, s)) \rightarrow ([a], s) \rightarrow ([c], s) \\ \text{mapAccumLfilter} &:: ((a, s) \rightarrow \text{Bool}) \rightarrow ((a, s) \rightarrow (c, s)) \rightarrow ([a], s) \rightarrow ([c], s) \end{aligned}$$

Pretendem-se as implementações de [mapAccumRfilter](#) e [mapAccumLfilter](#) sob a forma de *ana* / *cata* ou *hilomorfismos* em [Haskell](#), acompanhadas por diagramas.

Como caso de uso, sugere-se o que se dá no anexo E que, inspirado em [1], recorre à biblioteca [Data.Matrix](#).

## Problema 3

A fornecer na segunda edição deste enunciado

## Problema 4

A fornecer na segunda edição deste enunciado

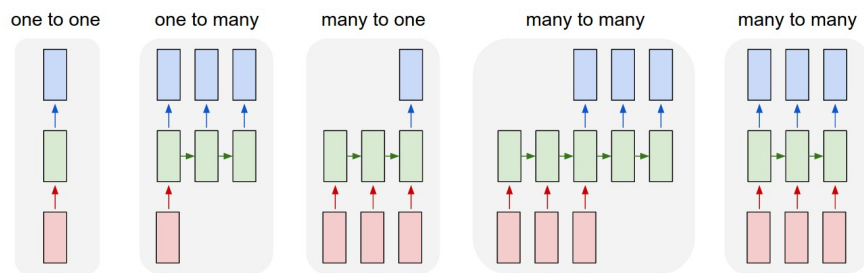


Figure 2: Várias tipologias de RNNs [1].

## Anexos

### A Natureza do trabalho a realizar

Este trabalho teórico-prático deve ser realizado por grupos de 3 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 em **todos** os exercícios do trabalho, para assim poderem responder a qualquer questão colocada na *defesa oral* do relatório.

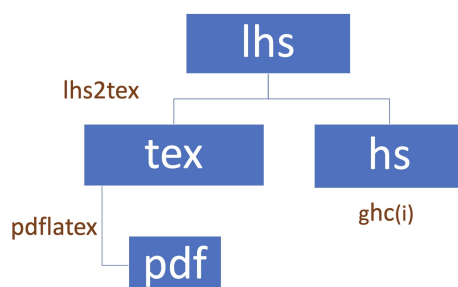
Para cumprir de forma integrada os objectivos do trabalho vamos recorrer a uma técnica de programação dita “[literária](#)” [2], cujo princípio base é o seguinte:

*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 `cp2425t.pdf` que está a ler é já um exemplo de [programação literária](#): foi gerado a partir do texto fonte `cp2425t.lhs`<sup>1</sup> que encontrará no [material pedagógico](#) desta disciplina descompactando o ficheiro `cp2425t.zip`.

Como se mostra no esquema abaixo, de um único ficheiro (*lhs*) gera-se um PDF ou faz-se a interpretação do código [Haskell](#) que ele inclui:



Vê-se assim que, para além do [GHCi](#), serão necessários os executáveis `pdflatex` e `lhs2TeX`. Para facilitar a instalação e evitar problemas de versões e conflitos com sistemas operativos, é recomendado

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

o uso do [Docker](#) tal como a seguir se descreve.

## B Docker

Recomenda-se o uso do [container](#) cuja imagem é gerada pelo [Docker](#) a partir do ficheiro `Dockerfile` que se encontra na diretoria que resulta de descompactar `cp2425t.zip`. Este [container](#) deverá ser usado na execução do [GHCi](#) e dos comandos relativos ao [L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X](#). (Ver também a `Makefile` que é disponibilizada.)

Após [instalar o Docker](#) e descarregar o referido zip com o código fonte do trabalho, basta executar os seguintes comandos:

```
$ docker build -t cp2425t .
$ docker run -v ${PWD}:/cp2425t -it cp2425t
```

**NB:** O objetivo é que o container seja usado *apenas* para executar o [GHCi](#) e os comandos relativos ao [L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X](#). Deste modo, é criado um *volume* (cf. a opção `-v ${PWD}:/cp2425t`) que permite que a diretoria em que se encontra na sua máquina local e a diretoria `/cp2425t` no [container](#) sejam partilhadas.

Pretende-se então que visualize/edite os ficheiros na sua máquina local e que os compile no [container](#), executando:

```
$ lhs2TeX cp2425t.lhs > cp2425t.tex
$ pdflatex cp2425t
```

[lhs2TeX](#) é o pre-processor que faz “pretty printing” de código [Haskell](#) em [L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X](#) e que faz parte já do [container](#). Alternativamente, basta executar

```
$ make
```

para obter o mesmo efeito que acima.

Por outro lado, o mesmo ficheiro `cp2425t.lhs` é executável e contém o “kit” básico, escrito em [Haskell](#), para realizar o trabalho. Basta executar

```
$ ghci cp2425t.lhs
```

Abra o ficheiro `cp2425t.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}
```

é seleccionado pelo [GHCi](#) para ser executado.

## C Em que consiste o TP

Em que consiste, então, o *relatório* a que se referiu acima? É a edição do texto que está a ser lido, preenchendo o anexo [F](#) 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 [Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>](#)) e o índice remissivo (com [makeindex](#)),

```
$ bibtex cp2425t.aux
$ makeindex cp2425t.idx
```

e recompilar o texto como acima se indicou. (Como já se disse, pode fazê-lo correndo simplesmente `make` no [container](#).)

No anexo [E](#) disponibiliza-se algum código [Haskell](#) relativo aos problemas que são colocados. Esse anexo deverá ser consultado e analisado à medida que isso for necessário.

Deve ser feito uso da [programação literária](#) para documentar bem o código que se desenvolver, em particular fazendo diagramas explicativos do que foi feito e tal como se explica no anexo [D](#) que se segue.

## D Como exprimir cálculos e diagramas em LaTeX/lhs2TeX

Como primeiro exemplo, estudar o texto fonte ([lhs](#)) do que está a ler<sup>1</sup> onde se obtém o efeito seguinte:<sup>2</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* [xymatrix](#), por exemplo:

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

## E Código fornecido

Teste relativo à figura da página [1](#):

*test<sub>1</sub> = mostwater hghts*

### Problema 2

Testes relativos a *mapAccumLfilter* e *mapAccumRfilter* em geral (comparar os *outputs*)

*test<sub>2a</sub> = mapAccumLfilter ((>10) · π<sub>1</sub>) f (odds 12, 0)*  
*test<sub>2b</sub> = mapAccumRfilter ((>10) · π<sub>1</sub>) f (odds 12, 0)*

<sup>1</sup> Procure e.g. por "sec:diagramas".

<sup>2</sup> Exemplos tirados de [\[4\]](#).

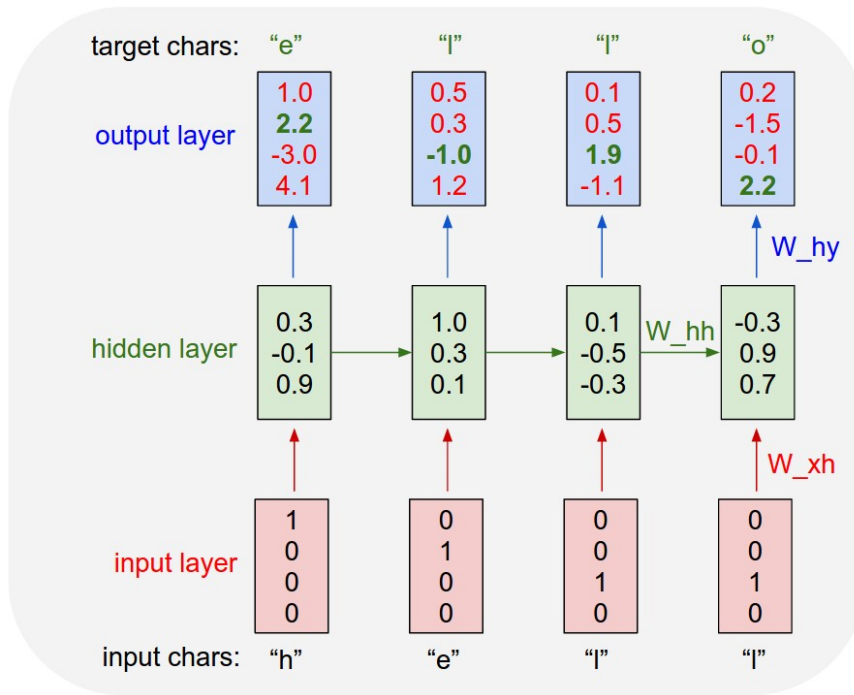


Figure 3: Exemplo *char seq* extraído de [1].

onde:

$$odds\ n = \text{map}\ ((1+) \cdot (2*))\ [0..n-1]$$

$$f\ (a, s) = (s, a + s)$$

Teste

$$test_{2c} = \text{mapAccumLfilter}\ \text{true}\ \text{step}\ ([x_1, x_2, x_3, x_4], h_0)$$

baseado no exemplo de Karpathy [1] que a figura 3 mostra, usando os dados seguintes:

- Estado inicial:

$$h_0 = \text{fromList}\ 3\ 1\ [1.0, 1.0, 1, 0]$$

- Step function:

$$\text{step}\ (x, h) = (\alpha\ (wy * h), \alpha\ (wh * h + wx * x))$$

- Função de activação:

$$\alpha = \text{fmap}\ \sigma\ \textbf{where}\ \sigma\ x = (\tanh\ x + 1) / 2$$

- Input layer:

$$\text{inp} = [x_1, x_2, x_3, x_4]$$

$$x_1 = \text{fromList}\ 4\ 1\ [1.0, 0, 0, 0]$$

$$x_2 = \text{fromList}\ 4\ 1\ [0, 1.0, 0, 0]$$

$$x_3 = \text{fromList}\ 4\ 1\ [0, 0, 1.0, 0]$$

$$x_4 = x_3$$

- Matrizes exemplo:

```
wh = fromList 3 3 [0.4, -0.2, 1.6, -3.1, 1.4, 0.1, 5.4, -2.7, 0.1]
wy = fromList 4 3 [2.1, 1.1, 0.8, 1.3, -6.4, -3.4, -2.7, -3.8, -1.3, -0.5, -0.9, -0.4]
wx = fromLists [[0.0, -51.9, 0.0, 0.0], [0.0, 26.6, 0.0, 0.0], [-16.7, -5.5, -0.1, 0.1]]
```

**NB:** Podem ser definidos e usados outros dados em função das experiências que se queiram fazer.

## F Soluções dos alunos

Os alunos devem colocar neste anexo as suas soluções para os 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 ao anexo, bem como diagramas e/ou outras funções auxiliares que sejam necessárias.

**Importante:** Não pode ser alterado o texto deste ficheiro fora deste anexo.

### Problema 1

Vamos utilizar a estratégia de *divide and conquer*, isto é, vamos construir um anamorfismo que devolve uma lista com as maiores áreas possíveis e um catamorfismo para obter a maior dessas áreas.

Para fazer isto de forma otimal, comecemos por calcular a área com base no primeiro e último elemento de uma lista não vazia  $l$ .

Sendo assim, o cálculo da área é dado pela função:

$$\text{area } l = (\min (\text{head } l) (\text{last } l)) * ((\text{length } l) - 1)$$

A seguir, descartamos o menor elemento entre primeiro e último elemento da lista, de forma a encontrar um valor maior. Para isso temos dois casos:

1. Se  $\text{head } l \geq \text{last } l$ , então isto significa que calculámos a água armazenada para o recipiente de altura  $\text{last } l$ , por isso descartamos o  $\text{last } l$ .
2. Se  $\text{head } l < \text{last } l$ , então isto significa que calculámos a água armazenada para o recipiente de altura  $\text{head } l$ , por isso descartamos o  $\text{head } l$ .

Recursivamente, isto pode ser escrito como

$$\begin{cases} \text{bestAreas } [] = [] \\ \text{bestAreas } l = (\text{area } l) : (\text{if } \text{head } l < \text{last } l \text{ then } \text{bestAreas } (\text{tail } l) \text{ else } \text{bestAreas } (\text{init } l)) \end{cases}$$

Tornando esta definição point-free, temos

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \text{bestAreas } [] = [] \\ \text{bestAreas } l = i_2 (\text{area } l) : (\text{if } \text{head } l < \text{last } l \text{ then } \text{bestAreas } (\text{tail } l) \text{ else } \text{bestAreas } (\text{init } l)) \end{cases} \\ \equiv & \quad \{ \text{definição pointwise, 72, 73} \} \\ & \begin{cases} \text{bestAreas} \cdot \text{nil} = \text{nil} \\ \text{bestAreas} \cdot \text{id} = \text{cons} \cdot \langle \text{area}, \text{cond } (\widehat{(<)}) \cdot \langle \text{head}, \text{last} \rangle \rangle (\text{bestAreas} \cdot \text{tail}) (\text{bestAreas} \cdot \text{init}) \end{cases} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&\equiv \{ \text{1ª Lei de fusão do condicional} \} \\
&\quad \left\{ \begin{array}{l} bestAreas \cdot nil = nil \\ bestAreas \cdot id = cons \cdot \langle area, bestAreas \cdot (cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle \end{array} \right\} \\
&\equiv \{ Eq+, Fusão+ \} \\
&\quad bestAreas \cdot [nil, id] = [nil, cons \cdot \langle area, bestAreas \cdot (cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle] \\
&\equiv \{ \text{definição do isomorfismo } in_{id} = [nil, id] \text{ e Absorção-+} \} \\
&\quad bestAreas \cdot in_{id} = [nil, cons] \cdot (id + \langle area, bestAreas \cdot (cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle) \\
&\equiv \{ \text{isomorfismo } in_{id}/out_{id} \text{ e definição do isomorfismo } \mathbf{in} = [nil, cons] \} \\
&\quad bestAreas = \mathbf{in} \cdot (id + \langle area, bestAreas \cdot (cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle) \cdot out_{id} \\
&\equiv \{ \text{Absorção-x, funtor-+} \} \\
&\quad bestAreas = \mathbf{in} \cdot (id + (id \times bestAreas)) \cdot (id + \langle area, cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle) \cdot out_{id} \\
&\equiv \{ \text{Universal-ana} \} \\
&\quad bestAreas = \llbracket (id + \langle area, cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle \cdot out_{id} \rrbracket \\
&\square
\end{aligned}$$

Portanto, o *divide* desse anamorfismo é  $(id + \langle area, cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle) \cdot out$ . Resultando assim no diagrama do anamorfismo

$$\begin{array}{ccc}
\mathbb{N}_0^* & \xrightarrow{\text{divide}} & 1 + \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0^* \\
bestAreas = \llbracket divide \rrbracket \downarrow & & \downarrow id + id \times bestAreas \\
\mathbb{N}_0^* & \xleftarrow{\mathbf{in}} & 1 + \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0^*
\end{array}$$

Além disso, já vimos nas aulas que o catamorfismo de listas

$$maxList = \llbracket [zero, \widehat{max}] \rrbracket$$

em que  $conquer = [zero, \widehat{max}]$ , é responsável por obter o maior valor numa lista de números não negativos, podendo ser representado pelo seguinte diagrama

$$\begin{array}{ccc}
\mathbb{N}_0^* & \xrightarrow{out} & 1 + \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0^* \\
maxList = \llbracket conquer \rrbracket \downarrow & & \downarrow id + (id \times maxList) \\
\mathbb{N}_0 & \xleftarrow{conquer} & 1 + \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0
\end{array}$$

Para evitar conflito entre os tipos *Int* e *Integer*, modificamos o *conquer* para

$$conquer = [zero, \widehat{max} \cdot (fromIntegral \times fromIntegral)]$$

Portanto, temos

$$\begin{aligned}
mostwater &= \llbracket conquer, divide \rrbracket \\
divide &= (id + \langle area, cond (\widehat{(<)}) \cdot \langle head, last \rangle) tail\ init \rangle) \cdot out_{id}
\end{aligned}$$

$conquer = [zero, \widehat{max} \cdot (fromIntegral \times fromIntegral)]$   
 $area\ l = (min\ (head\ l)\ (last\ l)) * ((length\ l) - 1)$   
 $out_{id}\ [] = i_1\ ()$   
 $out_{id}\ (h : t) = i_2\ (h : t)$

Com diagrama final

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbb{N}_0^* & \xrightarrow{out_{id}} & 1 + (\mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0^*) \\
 \llbracket divide \rrbracket \downarrow & & \downarrow id + (id \times divide) \\
 \mathbb{N}_0^* & \xleftarrow{\mathbf{in}} & 1 + (\mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0^*) \\
 \llbracket conquer \rrbracket \downarrow & & \downarrow id + id \times conquer \\
 \mathbb{N}_0 & \xleftarrow{conquer} & 1 + \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0
 \end{array}$$

## Problema 2

$mapAccumRfilter\ p\ f = \perp$   
 $mapAccumLfilter\ p\ f = \perp$

# Index

$\LaTeX$ , 4

**bibtex**, 4

**lhs2TeX**, 3–5

**makeindex**, 4

**pdflatex**, 3

**xymatrix**, 5

Combinador “pointfree”

*cata*

    Naturais, 5

*mapAccumL*, 2

*mapAccumR*, 2

*split*, 5

Cálculo de Programas, 1, 3

  Material Pedagógico, 3

Docker, 4

  container, 4, 5

Função

$\pi_1$ , 5

$\pi_2$ , 5

*map*, 6

Haskell, 1–5

  Hackage

    Data.Matrix, 2

  interpretador

    GHCi, 3, 4

  Literate Haskell, 3

Números naturais ( $\mathbb{N}$ ), 5

Programação

  literária, 3, 5

Rede neuronal, 2

  RNN, 2, 3

## References

- [1] A. Karpathy. The unreasonable effectiveness of recurrent neural networks, 2015. Blog: <http://karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness>, last read: June 7, 2025.
- [2] D.E. Knuth. *Literate Programming*. CSLI Lecture Notes Number 27. Stanford University Center for the Study of Language and Information, Stanford, CA, USA, 1992.
- [3] C. Olah. Neural networks, types, and functional programming, 2015. Blog: <http://colah.github.io/posts/2015-09-NN-Types-FP/>, last read: June 7, 2025.
- [4] J.N. Oliveira. Program Design by Calculation, 2024. Draft of textbook in preparation. First version: 1998. Current version: Sep. 2024. Informatics Department, University of Minho ([pdf](#)).