

# Cálculo de Programas

## Trabalho Prático

### MiEI+LCC — 2020/21

Departamento de Informática  
Universidade do Minho

Junho de 2021

Grupo nr.	34
a22222	Afonso Trindade
a82358	Inês Marinho
a93229	Mariana Dinis Rodrigues
a33333	Jéssica Fernandes

## 1 Preâmbulo

**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, 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.

## 2 Documentação

Para cumprir de forma integrada os objectivos enunciados acima vamos recorrer a uma técnica de programação dita “**literária**” [?], 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 `cp2021t.pdf` que está a ler é já um exemplo de **programação literária**: foi gerado a partir do texto fonte `cp2021t.lhs`<sup>1</sup> que encontrará no **material pedagógico** desta disciplina descompactando o ficheiro `cp2021t.zip` e executando:

```
$ lhs2TeX cp2021t.lhs > cp2021t.tex
$ pdflatex cp2021t
```

em que **lhs2tex** é um pre-processador 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 --lib
```

Por outro lado, o mesmo ficheiro `cp2021t.lhs` é executável e contém o “kit” básico, escrito em **Haskell**, para realizar o trabalho. Basta executar

```
$ ghci cp2021t.lhs
```

---

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

Abra o ficheiro `cp2021t.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.

### 3 Como realizar o trabalho

Este trabalho teórico-prático deve ser realizado por grupos de 3 (ou 4) 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 cp2021t.aux
$ makeindex cp2021t.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 --lib
```

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

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

Pode-se ainda controlar o número de casos de teste e sua complexidade, como o seguinte exemplo mostra:

```
> quickCheckWith stdArgs { maxSuccess = 200, maxSize = 10 } prop
+++ OK, passed 200 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.

#### 3.1 Stack

O **Stack** é um programa útil para criar, gerir e manter projetos em **Haskell**. Um projeto criado com o Stack possui uma estrutura de pastas muito específica:

- Os módulos auxiliares encontram-se na pasta *src*.
- O módulo principal encontra-se na pasta *app*.
- A lista de dependências externas encontra-se no ficheiro *package.yaml*.

Pode aceder ao **GHCI** utilizando o comando:

```
stack ghci
```

Garanta que se encontra na pasta mais externa **do projeto**. A primeira vez que correr este comando as dependências externas serão instaladas automaticamente.

Para gerar o PDF, garanta que se encontra na directoria *app*.

## Problema 1

Os tipos de dados algébricos estudados ao longo desta disciplina oferecem uma grande capacidade expressiva ao programador. Graças à sua flexibilidade, torna-se trivial implementar DSLs e até mesmo linguagens de programação.

Paralelamente, um tópico bastante estudado no âmbito de Deep Learning é a derivação automática de expressões matemáticas, por exemplo, de derivadas. Duas técnicas que podem ser utilizadas para o cálculo de derivadas são:

- *Symbolic differentiation*
- *Automatic differentiation*

*Symbolic differentiation* consiste na aplicação sucessiva de transformações (leia-se: funções) que sejam congruentes com as regras de derivação. O resultado final será a expressão da derivada.

O leitor atento poderá notar um problema desta técnica: a expressão inicial pode crescer de forma descontrolada, levando a um cálculo pouco eficiente. *Automatic differentiation* tenta resolver este problema, calculando o valor da derivada da expressão em todos os passos. Para tal, é necessário calcular o valor da expressão e o valor da sua derivada.

Vamos de seguida definir uma linguagem de expressões matemáticas simples e implementar as duas técnicas de derivação automática. Para isso, seja dado o seguinte tipo de dados,

```
data ExpAr a = X
  | N a
  | Bin BinOp (ExpAr a) (ExpAr a)
  | Un UnOp (ExpAr a)
  deriving (Eq, Show)
```

onde *BinOp* e *UnOp* representam operações binárias e unárias, respectivamente:

```
data BinOp = Sum
  | Product
  deriving (Eq, Show)
data UnOp = Negate
  | E
  deriving (Eq, Show)
```

O construtor *E* simboliza o exponencial de base *e*.

Assim, cada expressão pode ser uma variável, um número, uma operação binária aplicada às devidas expressões, ou uma operação unária aplicada a uma expressão. Por exemplo,

*Bin Sum X (N 10)*

designa  $x + 10$  na notação matemática habitual.

1. A definição das funções *inExpAr* e *baseExpAr* para este tipo é a seguinte:

```
inExpAr = [X, num_ops] where
  num_ops = [N, ops]
  ops = [bin, Un]
  bin (op, (a, b)) = Bin op a b
baseExpAr f g h j k l z = f + (g + (h × (j × k) + l × z))
```

Defina as funções *outExpAr* e *recExpAr*, e teste as propriedades que se seguem.

**Propriedade [QuickCheck] 1** *inExpAr* e *outExpAr* são testemunhas de um isomorfismo, isto é, *inExpAr* · *outExpAr* = *id* e *outExpAr* · *inExpAr* = *id*:

```
prop_in_out_idExpAr :: (Eq a) => ExpAr a -> Bool
prop_in_out_idExpAr = inExpAr · outExpAr ≡ id
prop_out_in_idExpAr :: (Eq a) => OutExpAr a -> Bool
prop_out_in_idExpAr = outExpAr · inExpAr ≡ id
```

2. Dada uma expressão aritmética e um escalar para substituir o  $X$ , a função

$$eval\_exp :: Floating a \Rightarrow a \rightarrow (ExpAr a) \rightarrow a$$

calcula o resultado da expressão. Na página 13 esta função está expressa como um catamorfismo. Defina o respectivo gene e, de seguida, teste as propriedades:

**Propriedade [QuickCheck] 2** A função *eval\_exp* respeita os elementos neutros das operações.

$$\begin{aligned} prop\_sum\_idr &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_sum\_idr a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} sum\_idr \textbf{ where} \\ sum\_idr &= eval\_exp a (Bin Sum exp (N 0)) \\ prop\_sum\_idl &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_sum\_idl a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} sum\_idl \textbf{ where} \\ sum\_idl &= eval\_exp a (Bin Sum (N 0) exp) \\ prop\_product\_idr &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_product\_idr a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} prod\_idr \textbf{ where} \\ prod\_idr &= eval\_exp a (Bin Product exp (N 1)) \\ prop\_product\_idl &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_product\_idl a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} prod\_idl \textbf{ where} \\ prod\_idl &= eval\_exp a (Bin Product (N 1) exp) \\ prop\_e\_id &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow Bool \\ prop\_e\_id a &= eval\_exp a (Un E (N 1)) \equiv expd 1 \\ prop\_negate\_id &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow Bool \\ prop\_negate\_id a &= eval\_exp a (Un Negate (N 0)) \equiv 0 \end{aligned}$$

**Propriedade [QuickCheck] 3** Negar duas vezes uma expressão tem o mesmo valor que não fazer nada.

$$\begin{aligned} prop\_double\_negate &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_double\_negate a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} eval\_exp a (Un Negate (Un Negate exp)) \end{aligned}$$

3. É possível otimizar o cálculo do valor de uma expressão aritmética tirando proveito dos elementos absorventes de cada operação. Implemente os genes da função

$$optimize\_eval :: (Floating a, Eq a) \Rightarrow a \rightarrow (ExpAr a) \rightarrow a$$

que se encontra na página 13 expressa como um hilomorfismo<sup>2</sup> e teste as propriedades:

**Propriedade [QuickCheck] 4** A função *optimize\_eval* respeita a semântica da função *eval*.

$$\begin{aligned} prop\_optimize\_respects\_semantics &:: (Floating a, Real a) \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow Bool \\ prop\_optimize\_respects\_semantics a exp &= eval\_exp a exp \stackrel{?}{=} optimize\_eval a exp \end{aligned}$$

4. Para calcular a derivada de uma expressão, é necessário aplicar transformações à expressão original que respeitem as regras das derivadas:<sup>3</sup>

- Regra da soma:

$$\frac{d}{dx}(f(x) + g(x)) = \frac{d}{dx}(f(x)) + \frac{d}{dx}(g(x))$$

<sup>2</sup>Qual é a vantagem de implementar a função *optimize\_eval* utilizando um hilomorfismo em vez de utilizar um catamorfismo com um gene "inteligente"?

<sup>3</sup>Apesar da adição e multiplicação gozarem da propriedade comutativa, há que ter em atenção a ordem das operações por causa dos testes.

- Regra do produto:

$$\frac{d}{dx}(f(x)g(x)) = f(x) \cdot \frac{d}{dx}(g(x)) + \frac{d}{dx}(f(x)) \cdot g(x)$$

Defina o gene do catamorfismo que ocorre na função

$$sd :: Floating a \Rightarrow ExpAr a \rightarrow ExpAr a$$

que, dada uma expressão aritmética, calcula a sua derivada. Testes a fazer, de seguida:

**Propriedade [QuickCheck] 5** A função *sd* respeita as regras de derivação.

```
prop_const_rule :: (Real a, Floating a) => a -> Bool
prop_const_rule a = sd (N a) == N 0

prop_var_rule :: Bool
prop_var_rule = sd X == N 1

prop_sum_rule :: (Real a, Floating a) => ExpAr a -> ExpAr a -> Bool
prop_sum_rule exp1 exp2 = sd (Bin Sum exp1 exp2) == sum_rule where
  sum_rule = Bin Sum (sd exp1) (sd exp2)

prop_product_rule :: (Real a, Floating a) => ExpAr a -> ExpAr a -> Bool
prop_product_rule exp1 exp2 = sd (Bin Product exp1 exp2) == prod_rule where
  prod_rule = Bin Sum (Bin Product exp1 (sd exp2)) (Bin Product (sd exp1) exp2)

prop_e_rule :: (Real a, Floating a) => ExpAr a -> Bool
prop_e_rule exp = sd (Un E exp) == Bin Product (Un E exp) (sd exp)

prop_negate_rule :: (Real a, Floating a) => ExpAr a -> Bool
prop_negate_rule exp = sd (Un Negate exp) == Un Negate (sd exp)
```

5. Como foi visto, *Symbolic differentiation* não é a técnica mais eficaz para o cálculo do valor da derivada de uma expressão. *Automatic differentiation* resolve este problema calculando o valor da derivada em vez de manipular a expressão original.

Defina o gene do catamorfismo que ocorre na função

$$ad :: Floating a \Rightarrow a \rightarrow ExpAr a \rightarrow a$$

que, dada uma expressão aritmética e um ponto, calcula o valor da sua derivada nesse ponto, sem transformar manipular a expressão original. Testes a fazer, de seguida:

**Propriedade [QuickCheck] 6** Calcular o valor da derivada num ponto *r* via *ad* é equivalente a calcular a derivada da expressão e avalia-la no ponto *r*.

```
prop_congruent :: (Floating a, Real a) => a -> ExpAr a -> Bool
prop_congruent a exp = ad a exp == eval_exp a (sd exp)
```

## Problema 2

Nesta disciplina estudou-se como fazer **programação dinâmica** por cálculo, recorrendo à lei de recursividade mútua.<sup>4</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

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

---

<sup>4</sup>Lei (3.94) em [?], página 98.

$$f\ 0 = 1$$

$$f\ (n + 1) = fib\ n + f\ n$$

Obter-se-á de imediato

$$fib' = \pi_1 \cdot \text{for loop init where}$$

$$\text{loop } (fib, f) = (f, fib + f)$$

$$\text{init} = (1, 1)$$

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>5</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 do segundo grau  $ax^2 + bx + c$  em  $\mathbb{N}_0$ . Seguindo o método estudado nas aulas<sup>6</sup>, de  $f\ x = ax^2 + bx + c$  derivam-se duas funções mutuamente recursivas:

$$f\ 0 = c$$

$$f\ (n + 1) = f\ n + k\ n$$

$$k\ 0 = a + b$$

$$k\ (n + 1) = k\ n + 2\ a$$

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

$$f'\ a\ b\ c = \pi_1 \cdot \text{for loop init where}$$

$$\text{loop } (f, k) = (f + k, k + 2 * a)$$

$$\text{init} = (c, a + b)$$

O que se pede então, nesta pergunta? Dada a fórmula que dá o *n*-ésimo **número de Catalan**,

$$C_n = \frac{(2n)!}{(n+1)!(n!)} \quad (1)$$

derivar uma implementação de  $C_n$  que não calcule factoriais nenhuns. Isto é, derivar um ciclo-for

$$cat = \dots \cdot \text{for loop init where } \dots$$

que implemente esta função.

**Propriedade [QuickCheck] 7** A função proposta coincide com a definição dada:

$$prop\_cat = (\geq 0) \Rightarrow (catdef \equiv cat)$$

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

## Problema 3

As **curvas de Bézier**, designação dada em honra ao engenheiro **Pierre Bézier**, são curvas ubíquas na área de computação gráfica, animação e modelação. Uma curva de Bézier é uma curva paramétrica, definida por um conjunto  $\{P_0, \dots, P_N\}$  de pontos de controlo, onde  $N$  é a ordem da curva.

O algoritmo de *De Casteljau* é um método recursivo capaz de calcular curvas de Bézier num ponto. Apesar de ser mais lento do que outras abordagens, este algoritmo é numericamente mais estável, trocando velocidade por correção.

<sup>5</sup>Podem obviamente usar-se outros símbolos, mas numa primeira leitura dá jeito usarem-se tais nomes.

<sup>6</sup>Secção 3.17 de [?] e tópico **Recursividade mútua** nos vídeos das aulas teóricas.



Figura 1: Exemplos de curvas de Bézier retirados da [Wikipedia](#).

De forma sucinta, o valor de uma curva de Bézier de um só ponto  $\{P_0\}$  (ordem 0) é o próprio ponto  $P_0$ . O valor de uma curva de Bézier de ordem  $N$  é calculado através da interpolação linear da curva de Bézier dos primeiros  $N - 1$  pontos e da curva de Bézier dos últimos  $N - 1$  pontos.

A interpolação linear entre 2 números, no intervalo  $[0, 1]$ , é dada pela seguinte função:

```
linear1d :: Q -> Q -> OverTime Q
linear1d a b = formula a b where
  formula :: Q -> Q -> Float -> Q
  formula x y t = ((1.0 :: Q) - (toQ t)) * x + (toQ t) * y
```

A interpolação linear entre 2 pontos de dimensão  $N$  é calculada através da interpolação linear de cada dimensão.

O tipo de dados *NPoint* representa um ponto com  $N$  dimensões.

```
type NPoint = [Q]
```

Por exemplo, um ponto de 2 dimensões e um ponto de 3 dimensões podem ser representados, respetivamente, por:

```
p2d = [1.2, 3.4]
p3d = [0.2, 10.3, 2.4]
```

O tipo de dados *OverTime a* representa um termo do tipo  $a$  num dado instante (dado por um *Float*).

```
type OverTime a = Float -> a
```

O anexo C tem definida a função

```
calcLine :: NPoint -> (NPoint -> OverTime NPoint)
```

que calcula a interpolação linear entre 2 pontos, e a função

```
deCasteljau :: [NPoint] -> OverTime NPoint
```

que implementa o algoritmo respectivo.

1. Implemente *calcLine* como um catamorfismo de listas, testando a sua definição com a propriedade:

**Propriedade [QuickCheck] 8** Definição alternativa.

```
prop_calcLine_def :: NPoint -> NPoint -> Float -> Bool
prop_calcLine_def p q d = calcLine p q d == zipWithM linear1d p q d
```

2. Implemente a função *deCasteljau* como um hilomorfismo, testando agora a propriedade:

**Propriedade [QuickCheck] 9** *Curvas de Bézier são simétricas.*

```
prop_bezier_sym :: [[Q]] → Gen Bool
prop_bezier_sym l = all (<Δ) · calc_difs · bezs ($) elements ps where
  calc_difs = (λ(x, y) → zipWith (λw v → if w ≥ v then w - v else v - w) x y)
  bezs t = (deCasteljau l t, deCasteljau (reverse l) (fromQ (1 - (toQ t))))
  Δ = 1e-2
```

3. Corra a função `runBezier` e aprecie o seu trabalho<sup>7</sup> clicando na janela que é aberta (que contém, a verde, um ponto inicial) com o botão esquerdo do rato para adicionar mais pontos. A tecla `Delete` apaga o ponto mais recente.

## Problema 4

Seja dada a fórmula que calcula a média de uma lista não vazia  $x$ ,

$$\text{avg } x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad (2)$$

onde  $k = \text{length } x$ . Isto é, para sabermos a média de uma lista precisamos de dois catamorfismos: o que faz o somatório e o que calcula o comprimento a lista. Contudo, é fácil de ver que

$$\begin{aligned} \text{avg } [a] &= a \\ \text{avg } (a : x) &= \frac{1}{k+1} (a + \sum_{i=1}^k x_i) = \frac{a + k(\text{avg } x)}{k+1} \text{ para } k = \text{length } x \end{aligned}$$

Logo `avg` está em recursividade mútua com `length` e o par de funções pode ser expresso por um único catamorfismo, significando que a lista apenas é percorrida uma vez.

1. Recorra à lei de recursividade mútua para derivar a função `avg_aux = ([b, q])` tal que `avg_aux = (avg, length)` em listas não vazias.
2. Generalize o raciocínio anterior para o cálculo da média de todos os elementos de uma `LTree` recorrendo a uma única travessia da árvore (i.e. catamorfismo).

Verifique as suas funções testando a propriedade seguinte:

**Propriedade [QuickCheck] 10** *A média de uma lista não vazia e de uma `LTree` com os mesmos elementos coincide, a menos de um erro de 0.1 milésimas:*

```
prop_avg :: [Double] → Property
prop_avg = nonempty ⇒ diff ≤ 0.000001 where
  diff l = avg l - (avgLTree · genLTree) l
  genLTree = ([lsplit])
  nonempty = (>[])
```

## Problema 5

(NB: Esta questão é **opcional** e funciona como **valorização** apenas para os alunos que desejarem fazê-la.)

Existem muitas linguagens funcionais para além do `Haskell`, que é a linguagem usada neste trabalho prático. Uma delas é o `F#` da Microsoft. Na directoria `fsharp` encontram-se os módulos `Cp`, `Nat` e `LTree` codificados em `F#`. O que se pede é a biblioteca `BTree` escrita na mesma linguagem.

Modo de execução: o código que tiverem produzido nesta pergunta deve ser colocado entre o `\begin{verbatim}` e o `\end{verbatim}` da correspondente parte do anexo `D`. Para além disso, os grupos podem demonstrar o código na oral.

<sup>7</sup>A representação em Gloss é uma adaptação de um `projeto` de Harold Cooper.



# Anexos

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

Como primeiro exemplo, estudar o texto fonte deste trabalho para obter o efeito:<sup>8</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>9</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:

$$\exp x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!} \tag{3}$$

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 3.1 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>8</sup>Exemplos tirados de [?].

<sup>9</sup>Cf. [?], página 102.

## C Código fornecido

### Problema 1

```
expd :: Floating a => a -> a
expd = Prelude.exp
type OutExpAr a = () + (a + ((BinOp, (ExpAr a, ExpAr a)) + (UnOp, ExpAr a)))
```

### Problema 2

Definição da série de Catalan usando factoriais (1):

$$\text{catdef } n = (2 * n)! \div ((n + 1)! * n!)$$

Oráculo para inspecção dos primeiros 26 números de Catalan<sup>10</sup>:

```
oracle = [
  1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16796, 58786, 208012, 742900, 2674440, 9694845,
  35357670, 129644790, 477638700, 1767263190, 6564120420, 24466267020,
  91482563640, 343059613650, 1289904147324, 4861946401452
]
```

### Problema 3

Algoritmo:

```
deCasteljau :: [NPoint] -> OverTime NPoint
deCasteljau [] = nil
deCasteljau [p] = p
deCasteljau l = λpt -> (calcLine (p pt) (q pt)) pt where
  p = deCasteljau (init l)
  q = deCasteljau (tail l)
```

Função auxiliar:

```
calcLine :: NPoint -> (NPoint -> OverTime NPoint)
calcLine [] = nil
calcLine (p : x) = g p (calcLine x) where
  g :: (Q, NPoint -> OverTime NPoint) -> (NPoint -> OverTime NPoint)
  g (d, f) l = case l of
    [] -> nil
    (x : xs) -> λz -> concat $ (sequenceA [singl · linear1d d x, f xs]) z
```

2D:

```
bezier2d :: [NPoint] -> OverTime (Float, Float)
bezier2d [] = (0, 0)
bezier2d l = λz -> (fromQ × fromQ) · (λ[x, y] -> (x, y)) $ ((deCasteljau l) z)
```

Modelo:

```
data World = World { points :: [NPoint]
  , time :: Float
  }
initW :: World
initW = World [] 0
```

---

<sup>10</sup>Fonte: [Wikipedia](#).

```

tick :: Float → World → World
tick dt world = world { time = (time world) + dt }

actions :: Event → World → World
actions (EventKey (MouseButton LeftButton) Down _ p) world =
  world { points = (points world) ++ [(λ(x,y) → map toQ [x,y]) p] }
actions (EventKey (SpecialKey KeyDelete) Down _ _) world =
  world { points = cond (≡ []) id init (points world) }
actions _ world = world

scaleTime :: World → Float
scaleTime w = (1 + cos (time w)) / 2

bezier2dAtTime :: World → (Float, Float)
bezier2dAtTime w = (bezier2dAt w) (scaleTime w)

bezier2dAt :: World → OverTime (Float, Float)
bezier2dAt w = bezier2d (points w)

thicCirc :: Picture
thicCirc = ThickCircle 4 10

ps :: [Float]
ps = map fromQ ps' where
  ps' :: [Q]
  ps' = [0, 0.01 .. 1] -- interval

```

Gloss:

```

picture :: World → Picture
picture world = Pictures
  [ animateBezier (scaleTime world) (points world)
  , Color white · Line · map (bezier2dAt world) $ ps
  , Color blue · Pictures $ [ Translate (fromQ x) (fromQ y) thicCirc | [x,y] ← points world ]
  , Color green $ Translate cx cy thicCirc
  ] where
  (cx, cy) = bezier2dAtTime world

```

Animação:

```

animateBezier :: Float → [NPoint] → Picture
animateBezier _ [] = Blank
animateBezier _ [_] = Blank
animateBezier t l = Pictures
  [ animateBezier t (init l)
  , animateBezier t (tail l)
  , Color red · Line $ [a, b]
  , Color orange $ Translate ax ay thicCirc
  , Color orange $ Translate bx by thicCirc
  ] where
  a@(ax, ay) = bezier2d (init l) t
  b@(bx, by) = bezier2d (tail l) t

```

Propriedades e main:

```

runBezier :: IO ()
runBezier = play (InWindow "Bézier" (600,600) (0,0))
  black 50 initW picture actions tick

runBezierSym :: IO ()
runBezierSym = quickCheckWith (stdArgs { maxSize = 20, maxSuccess = 200 }) prop_bezier_sym

```

Compilação e execução dentro do interpretador:<sup>11</sup>

```

main = runBezier
run = do { system "ghc cp2021t"; system "./cp2021t" }

```

---

<sup>11</sup>Pode ser útil em testes envolvendo **Gloss**. Nesse caso, o teste em causa deve fazer parte de uma função *main*.

## QuickCheck

Código para geração de testes:

```
instance Arbitrary UnOp where
  arbitrary = elements [Negate, E]
instance Arbitrary BinOp where
  arbitrary = elements [Sum, Product]
instance (Arbitrary a)  $\Rightarrow$  Arbitrary (ExpAr a) where
  arbitrary = do
    binop  $\leftarrow$  arbitrary
    unop  $\leftarrow$  arbitrary
    exp1  $\leftarrow$  arbitrary
    exp2  $\leftarrow$  arbitrary
    a  $\leftarrow$  arbitrary
    frequency  $\cdot$  map (id  $\times$  pure) $ [(20, X), (15, N a), (35, Bin binop exp1 exp2), (30, Un unop exp1)]

infixr 5  $\stackrel{?}{\Rightarrow}$ 
( $\stackrel{?}{\Rightarrow}$ ) :: Real a  $\Rightarrow$  a  $\rightarrow$  a  $\rightarrow$  Bool
( $\stackrel{?}{\Rightarrow}$ ) x y = (to $_{\mathbb{Q}}$  x)  $\equiv$  (to $_{\mathbb{Q}}$  y)
```

## Outras funções auxiliares

Lógicas:

```
infixr 0  $\Rightarrow$ 
( $\Rightarrow$ ) :: (Testable prop)  $\Rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  prop)  $\rightarrow$  a  $\rightarrow$  Property
p  $\Rightarrow$  f =  $\lambda a \rightarrow$  p a  $\Rightarrow$  f a

infixr 0  $\Leftrightarrow$ 
( $\Leftrightarrow$ ) :: (a  $\rightarrow$  Bool)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)  $\rightarrow$  a  $\rightarrow$  Property
p  $\Leftrightarrow$  f =  $\lambda a \rightarrow$  (p a  $\Rightarrow$  property (f a)) .&&. (f a  $\Rightarrow$  property (p a))

infixr 4  $\equiv$ 
( $\equiv$ ) :: Eq b  $\Rightarrow$  (a  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)
f  $\equiv$  g =  $\lambda a \rightarrow$  f a  $\equiv$  g a

infixr 4  $\leq$ 
( $\leq$ ) :: Ord b  $\Rightarrow$  (a  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)
f  $\leq$  g =  $\lambda a \rightarrow$  f a  $\leq$  g a

infixr 4  $\wedge$ 
( $\wedge$ ) :: (a  $\rightarrow$  Bool)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)  $\rightarrow$  (a  $\rightarrow$  Bool)
f  $\wedge$  g =  $\lambda a \rightarrow$  ((f a)  $\wedge$  (g a))
```

## D 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, diagramas e/ou outras funções auxiliares que sejam necessárias.

Valoriza-se a escrita de *pouco* código que corresponda a soluções simples e elegantes.

### Problema 1

São dadas:

$$\begin{aligned} cataExpAr \ g &= g \cdot recExpAr \ (cataExpAr \ g) \cdot outExpAr \\ anaExpAr \ g &= inExpAr \cdot recExpAr \ (anaExpAr \ g) \cdot g \\ hyloExpAr \ h \ g &= cataExpAr \ h \cdot anaExpAr \ g \\ eval\_exp &:: Floating \ a \Rightarrow a \rightarrow (ExpAr \ a) \rightarrow a \\ eval\_exp \ a &= cataExpAr \ (g\_eval\_exp \ a) \\ optimize\_eval &:: (Floating \ a, Eq \ a) \Rightarrow a \rightarrow (ExpAr \ a) \rightarrow a \\ optimize\_eval \ a &= hyloExpAr \ (gopt \ a) \ clean \\ sd &:: Floating \ a \Rightarrow ExpAr \ a \rightarrow ExpAr \ a \\ sd &= \pi_2 \cdot cataExpAr \ sd\_gen \\ ad &:: Floating \ a \Rightarrow a \rightarrow ExpAr \ a \rightarrow a \\ ad \ v &= \pi_2 \cdot cataExpAr \ (ad\_gen \ v) \end{aligned}$$

#### 1. $outExpAr$ e $recExpAr$

As funções  $outExpAr$  e  $recExpAr$  são deduzidas através do tipo de dados do problema e com auxílio de alguns diagramas.

Sabendo que :

$$ExpAr \ A \xleftarrow{inExpAr} 1 + (A + (BinOp \times (ExpAr \ A \times ExpAr \ A) + (UnOp \times ExpAr \ A)))$$

$$inExpAr = [\underline{X}, [N, [bin, \widehat{Un}]]]$$

$$inExpAr \cdot outExpAr = id$$

$$outExpAr \cdot inExpAr = id$$

Pelas definições acima:

$$outExpAr \cdot inExpAr = id$$

$$\equiv \{ \text{Definição de } inExpAr \}$$

$$outExpAr \cdot [\underline{X}, [N, [bin, \widehat{Un}]]] = id$$

$$\equiv \{ \text{Fusão + (20)} \}$$

$$[outExpAr \cdot \underline{X}, outExpAr \cdot [N, [bin, \widehat{Un}]]] = id$$

$$\equiv \{ \text{Universal + (17) e Natural-id (1)} \}$$

$$\begin{cases} outExpAr \cdot \underline{X} = i_1 \\ outExpAr \cdot [N, [bin, \widehat{Un}]] = i_2 \end{cases}$$

$$\equiv \{ \text{Fusão + (20), Universal + (17) e Natural-id (1)} \}$$

$$\begin{cases} outExpAr \cdot \underline{X} = i_1 \\ \begin{cases} outExpAr \cdot N = i_2 \cdot i_1 \\ outExpAr \cdot [bin, \widehat{Un}] = i_2 \cdot i_2 \end{cases} \end{cases}$$

$$\equiv \{ \text{Fusão} + (20), \text{Universal} + (17) \text{ e Natural-id (1)} \}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{outExpAr} \cdot \underline{X} = i_1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{outExpAr} \cdot N = i_2 \cdot i_1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{outExpAr} \cdot \text{bin} = i_2 \cdot i_2 \cdot i_1 \\ \text{outExpAr} \cdot \widehat{Un} = i_2 \cdot i_2 \cdot i_2 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\equiv \{ \text{Igualdade Extensional (71) e Def-Comp (72)} \}$$

$$\begin{aligned} \text{outExpAr } \underline{X} \ x &= i_1 \ x \\ \text{outExpAr } (N \ x) &= i_2 \cdot i_1 \ x \\ \text{outExpAr } (\text{bin } (op, (a, b))) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_1 \ (op, (a, b)) \\ \text{outExpAr } \widehat{Un} \ (op, a) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_2 \ (op, a) \end{aligned}$$

$$\equiv \{ \text{Definição de Bin e Un} \}$$

$$\begin{aligned} \text{outExpAr } X &= i_1 \ () \\ \text{outExpAr } (N \ x) &= i_2 \cdot i_1 \ x \\ \text{outExpAr } (\text{Bin } op \ a \ b) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_1 \ (op, (a, b)) \\ \text{outExpAr } (\text{Un } op \ a) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_2 \ (op, a) \end{aligned}$$

Concluiu-se que:

$$\begin{aligned} \text{outExpAr } X &= i_1 \ () \\ \text{outExpAr } (N \ a) &= i_2 \cdot i_1 \ \$ \ a \\ \text{outExpAr } (\text{Bin } op \ a \ b) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_1 \ \$ \ (op, (a, b)) \\ \text{outExpAr } (\text{Un } op \ a) &= i_2 \cdot i_2 \cdot i_2 \ \$ \ (op, a) \end{aligned}$$

Representado por:

$$\text{ExpAr } A \xrightarrow{\text{outExpAr}} 1 + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A)))$$

E ainda:

$$\text{recExpAr } x = \text{baseExpAr } id \ id \ id \ x \ x \ id \ x$$

## 2. $g\_eval\_exp$

De seguida, apresenta-se a definição da função:

$$g\_eval\_exp \ num = [\underline{num}, [id, [\widehat{f}, \widehat{g}]]]$$

where

$$\begin{aligned} f \ \text{Sum} &= \widehat{(+)} \\ f \ \text{Product} &= \widehat{(*)} \\ g \ E &= \text{expd} \\ g \ \text{Negate} &= \text{negate} \end{aligned}$$

E o seu diagrama:

$$\begin{array}{ccc} \text{ExpAr } A \xrightarrow{\text{outExpAr}} 1 + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A))) & & \\ \downarrow \text{eval\_exp num} & & \downarrow id + (id + ((id \times (g\_eval\_exp \ num)^2) + (id \times g\_eval\_exp \ num))) \\ A \xleftarrow{g\_eval\_exp \ num} 1 + (A + (\text{BinOp} \times (A \times A) + (\text{UnOp} \times A))) & & \end{array}$$

### 3. *clean* e *gopt*

Optimizando a *ExpAr A* dada, através da utilização das regras da absorção e do elemento neutro, obtém-se:

```

clean (Bin Product (N 0) _) = outExpAr (N 0)
clean (Bin Product _ (N 0)) = outExpAr (N 0)
clean (Bin Product (N 1) l) = outExpAr l
clean (Bin Product l (N 1)) = outExpAr l
clean (Bin Sum a (N 0)) = outExpAr a
clean (Bin Sum (N 0) a) = outExpAr a
clean (Bin op (N a) (N b)) = outExpAr (N ((f op) a b))
  where
    f Sum = (+)
    f Product = (*)
clean (Un op (N a)) = outExpAr (N ((g op) a))
  where
    g E = expd
    g Negate = negate
clean l = outExpAr l

```

Feita essa otimização, fez-se a substituição do *X* pelo valor dado e calculou-se o respetivo valor da expressão, reutilizando a função *g\_eval\_exp*:

```

gopt :: Floating c => c -> b + (c + ((BinOp, (c, c)) + (UnOp, c))) -> c
gopt = g_eval_exp

```

De seguida, apresenta-se o diagrama do hilomorfismo:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{ExpAr } A & \xrightarrow{\text{clean}} & 1 + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A))) \\
 \downarrow \llbracket \text{clean} \rrbracket & & \downarrow \text{id} + (\text{id} + ((\text{id} \times \llbracket \text{clean} \rrbracket)^2) + (\text{id} \times \llbracket \text{clean} \rrbracket)) \\
 \text{ExpAr } A & \xrightleftharpoons[\text{outExpAr}]{\text{inExpAr}} & 1 + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A))) \\
 \downarrow \llbracket \text{gopt num} \rrbracket & & \downarrow \text{id} + (\text{id} + ((\text{id} \times \llbracket \text{gopt num} \rrbracket)^2) + (\text{id} \times \llbracket \text{gopt num} \rrbracket)) \\
 A & \xleftarrow{\text{gopt num}} & 1 + (A + (\text{BinOp} \times (A \times A) + (\text{UnOp} \times A)))
 \end{array}$$

### 4. *sd\_gen*

```

sd_gen :: Floating a =>
  () + (a + ((BinOp, ((ExpAr a, ExpAr a), (ExpAr a, ExpAr a))) + (UnOp, (ExpAr a, ExpAr a))))
  -> (ExpAr a, ExpAr a)
sd_gen = [(X, (N 1)), [construi_n, [construi_bin, construi_un]]]
  where
    construi_n a = (N a, N 0)
    construi_bin (Sum, (a, b)) = (Bin Sum ( $\pi_1$  a) ( $\pi_1$  b), Bin Sum ( $\pi_2$  a) ( $\pi_2$  b))
    construi_bin (Product, (a, b)) = (Bin Product ( $\pi_1$  a) ( $\pi_1$  b), segundo_bin)
    where
      segundo_bin = Bin Sum (Bin Product ( $\pi_1$  a) ( $\pi_2$  b)) (Bin Product ( $\pi_2$  a) ( $\pi_1$  b))
    construi_un (E, a) = (Un E ( $\pi_1$  a), Bin Product (Un E ( $\pi_1$  a)) ( $\pi_2$  a))
    construi_un (Negate, a) = (Un Negate ( $\pi_1$  a), Un Negate ( $\pi_2$  a))

```

É de notar que a função *sd\_gen* retorna o par (*ExpAr A*, *ExpAr A*), no qual, o segundo elemento irá ser a *ExpAr A* derivada da *ExpAr A* contida no primeiro elemento do par.

O diagrama correspondente à função é:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{ExpAr } A & \xrightarrow{\text{outExpAr}} & () + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A))) \\
 \downarrow \text{sd} & & \downarrow \text{id} + (\text{id} + (\text{id} \times (\text{sd\_gen} \times \text{sd\_gen}) + (\text{id} \times \text{sd\_gen}))) \\
 \text{ExpAr } A & \xleftarrow{\pi_2 \cdot \text{sd\_gen}} & () + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A))))
 \end{array}$$

## 5. *ad\_gen*

$$\text{ad\_gen } a = [(a, 1), [g, [\widehat{\text{bin\_op}}, \widehat{\text{un\_op}}]]]$$

where

$$g = \langle \text{id}, 0 \rangle$$

$$\text{bin\_op Sum } (a, b) = ((+) (\pi_1 a) (\pi_1 b), (+) (\pi_2 a) (\pi_2 b))$$

$$\text{bin\_op Product } (a, b) = ((* ) (\pi_1 a) (\pi_1 b), (+) ((* ) (\pi_1 a) (\pi_2 b)) ((* ) (\pi_2 a) (\pi_1 b)))$$

$$\text{un\_op E } a = (\text{expd } (\pi_1 a), (* ) (\pi_2 a) (\text{expd } (\pi_1 a)))$$

$$\text{un\_op Negate } a = (\text{negate } (\pi_1 a), \text{negate } (\pi_2 a))$$

Note que a função *ad\_gen* retorna o par  $(A, A)$ , onde, o primeiro elemento irá ser o valor da *ExpAr A* com a substituição do valor dado e o segundo, irá ser o valor da sua derivada.

O diagrama correspondente à função é:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{ExpAr } A & \xrightarrow{\text{outExpAr}} & () + (A + (\text{BinOp} \times (\text{ExpAr } A \times \text{ExpAr } A) + (\text{UnOp} \times \text{ExpAr } A))) \\
 \downarrow \text{ad} & & \downarrow \text{id} + (\text{id} + (\text{id} \times (\text{ad\_gen } A \times \text{ad\_gen } A) + (\text{id} \times \text{ad\_gen } A))) \\
 A & \xleftarrow{\pi_2 \cdot \text{ad\_gen}} & () + (A + (\text{BinOp} \times ((A \times A) \times (A \times A)) + (\text{UnOp} \times (A \times A))))
 \end{array}$$

## Problema 2

Definir

$$\text{loop } (c, (s, h)) = (c * s \div h, (s + 4, h + 1))$$

$$\text{inic} = (1, (2, 2))$$

$$\text{prj} = \pi_1$$

por forma a que

$$\text{cat} = \text{prj} \cdot \text{for loop inic}$$

seja a função pretendida. **NB:** usar divisão inteira. Apresentar de seguida a justificação da solução encontrada.

Sabendo que:

$$c \ n = \frac{(2 \ n)!}{(n+1)! * n!}$$

Vamos calcular  $c \ (n+1)$  :

$$c \ (n+1) = \frac{(2 \ n+2)!}{(n+2)! * (n+1)!} = \frac{(2 \ n+2) * (2 \ n+1) * (2 \ n)!}{(n+2) * (n+1)! * (n+1) * n!} = \frac{(2 \ n+2) * (2 \ n+1) * (c \ n)}{(n+2) * (n+1)} = \frac{2 * (2 \ n+1)}{n+2} * (c \ n)$$

Considerando:

$$s \ n = 2 * (2 \ n + 1) = 4 * n + 2$$

$$h \ n = n + 2$$

Podendo, com isto concluir:

$$\begin{cases} c \ 0 = 1 \\ c \ (n+1) = c \ n * \frac{s \ n}{h \ n} \end{cases}$$

$$\begin{cases} s \ 0 = 2 \\ s \ (n+1) = s \ n + 4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} h \ 0 = 2 \\ h \ (n+1) = h \ n + 1 \end{cases}$$



Fazendo a demonstração:

$$\begin{aligned}
& \begin{cases} c \cdot 0 = 1 \\ c \cdot (n+1) = c \cdot n * \frac{s \cdot n}{h \cdot n} \end{cases} \\
& \begin{cases} s \cdot 0 = 2 \\ s \cdot (n+1) = s \cdot n + 4 \end{cases} \\
& \begin{cases} h \cdot 0 = 2 \\ h \cdot (n+1) = h \cdot n + 1 \end{cases} \\
\equiv & \quad \{ \text{Igualdade extensional (71) (6 vezes)} \} \\
& \begin{cases} c \cdot \underline{0} = \underline{1} \\ c \cdot \text{succ} = (\widehat{*}) \cdot \langle c, (\widehat{/}) \cdot \langle s, h \rangle \rangle \end{cases} \\
& \begin{cases} s \cdot \underline{0} = \underline{2} \\ s \cdot \text{succ} = (+4) \cdot s \end{cases} \\
& \begin{cases} h \cdot \underline{0} = \underline{2} \\ h \cdot \text{succ} = \text{succ} \cdot h \end{cases} \\
\equiv & \quad \{ \text{Eq- + (27) (3 vezes)} \} \\
& [c \cdot \underline{0}, c \cdot \text{succ}] = [\underline{1}, (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot \langle c, s \rangle, h \rangle] \\
& [s \cdot \underline{0}, s \cdot \text{succ}] = [\underline{2}, (+4) \cdot s] \\
& [h \cdot \underline{0}, h \cdot \text{succ}] = [\underline{2}, \text{succ} \cdot h] \\
\equiv & \quad \{ \text{in} = [\underline{0}, \text{succ}] , \text{Fusão x (3 vezes)} \} \\
& c \cdot \text{in} = [\underline{1}, (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot \langle c, s \rangle, h \rangle] \\
& s \cdot \text{in} = [\underline{2}, (+4) \cdot s] \\
& h \cdot \text{in} = [\underline{2}, \text{succ} \cdot h] \\
\equiv & \quad \{ \text{Absorção +} \} \\
& c \cdot \text{in} = [\underline{1}, (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot \langle \pi_1, \pi_1 \cdot \pi_2 \rangle, \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle] \cdot (id + \langle c, \langle s, h \rangle \rangle) \\
& s \cdot \text{in} = [\underline{2}, (+4) \cdot (\pi_1 \cdot \pi_2)] \cdot (id + \langle c, \langle s, h \rangle \rangle) \\
& h \cdot \text{in} = [\underline{2}, \text{succ} \cdot (\pi_2 \cdot \pi_2)] \cdot (id + \langle c, \langle s, h \rangle \rangle) \\
\equiv & \quad \{ \text{Def- x (lei 10) e Fokkinga com 3 elementos} \} \\
& \langle c, \langle s, h \rangle \rangle = \langle \langle [\underline{1}, (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot (id \times \pi_1), \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle], \langle [\underline{2}, (+4) \cdot \pi_1 \cdot \pi_2], [\underline{2}, \text{succ} \cdot \pi_2 \cdot \pi_2] \rangle \rangle \rangle \\
\equiv & \quad \{ \text{Lei da troca (28)} \} \\
& \langle c, \langle s, h \rangle \rangle = \langle \langle [\underline{1}, (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot (id \times \pi_1), \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle], \langle [\underline{2}, \underline{2}], \langle (+4) \cdot \pi_1 \cdot \pi_2, \text{succ} \cdot \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle \rangle \rangle \rangle \\
\equiv & \quad \{ \text{Lei da troca (28)} \} \\
& \langle c, \langle s, h \rangle \rangle = \langle \langle [\underline{1}, \langle \underline{2}, \underline{2} \rangle], \langle (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot (id \times \pi_1), \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle, \langle (+4) \cdot \pi_1 \cdot \pi_2, \text{succ} \cdot \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle \rangle \rangle \\
\equiv & \quad \{ \text{for b i} = (\underline{i}, b) \} \\
& \langle c, \langle s, h \rangle \rangle = \text{for } (1, (\underline{2}, \underline{2})) \langle (\widehat{/}) \cdot \langle (\widehat{*}) \cdot (id \times \pi_1), \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle, \langle (+4) \cdot \pi_1 \cdot \pi_2, \text{succ} \cdot \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle \rangle
\end{aligned}$$

### Problema 3

#### 1. calcLine

Com base na função fornecida, obteve-se:

```
calcLine :: NPoint → (NPoint → OverTime NPoint)
calcLine = cataList [· · nil, g] where
  g (d, f) l = case l of
    [] → nil
    (x : xs) → λz → concat $ (sequenceA [singl · linear1d d x, f xs]) z
```

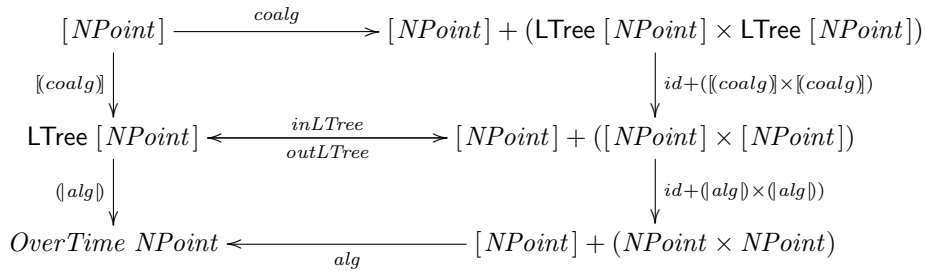
#### 2. deCasteljau

Com o auxílio do diagrama abaixo apresentado e da função dada, atingiu-se o resultado seguinte:

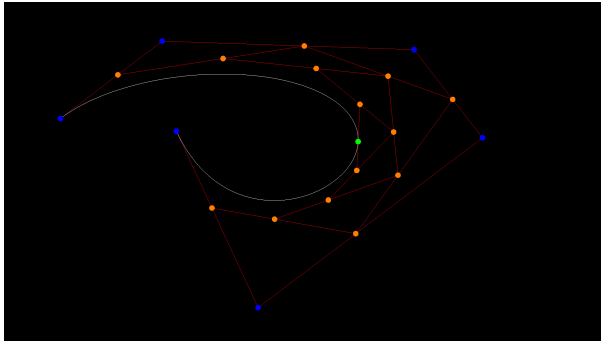
```
deCasteljau :: [NPoint] → OverTime NPoint
deCasteljau l pt = hyloAlgForm alg coalg l where
  coalg list = case list of
    [] → i1 []
    [a] → i1 a
    _ → i2 $ ⟨init, tail⟩ list
  alg = [id, f]
  f (p, q) = calcLine p q pt
```

$$\text{hyloAlgForm } h \, g = \llbracket h \rrbracket \cdot \llbracket g \rrbracket$$

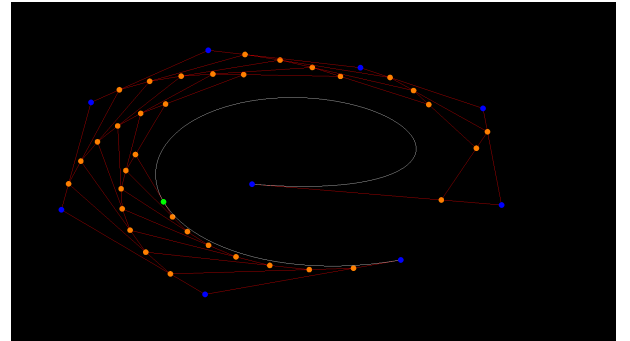
Diagrama em questão:



#### 3. Resultado da runBezier



(a)



(b)

Figura 2: Resultados da função runBezier.

## Problema 4

### 1. Solução para listas não vazias:

$$avg = \pi_1 \cdot avg\_aux$$

$$avg\_aux = cataList\ gene$$

where

$$gene = [\langle \underline{0}, \underline{0} \rangle, \langle \widehat{(\prime)} \cdot \widehat{(+)} \cdot \langle \pi_1, \widehat{(*)} \cdot \pi_2 \rangle, succ \cdot \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle, succ \cdot \pi_2 \cdot \pi_2 \rangle]$$

Descrita pelo diagrama seguinte:

$$\begin{array}{ccc} Double^* & \xrightarrow{outList} & 1 + (Double \times Double^*) \\ avg \downarrow & & \downarrow id + (id \times avg\_aux) \\ Double & \xleftarrow{\pi_1 \cdot avg\_aux} & 1 + (Double \times (Double \times Double)) \end{array}$$

### 2. Solução para árvores de tipo **LTree**:

$$avgLTree = \pi_1 \cdot \langle gene \rangle \text{ where}$$

$$gene = [\langle id, \underline{1} \rangle, final]$$

$$final = \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle \cdot (\widehat{(+)} \times \widehat{(+)}) \cdot \langle \widehat{(*)} \times \widehat{(*)}, \pi_2 \times \pi_2 \rangle$$

Na definição do gene acima, apresenta-se a versão pointfree da função "final".

Correspondendo à versão pointwise seguinte:

$$\begin{aligned} final &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle \cdot (\widehat{(+)} \times \widehat{(+)}) \cdot \langle \widehat{(*)} \times \widehat{(*)}, \pi_2 \times \pi_2 \rangle \\ &\equiv \{ \text{Igualdade Extensional (71) e Def-comp(72)} \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle \cdot (\widehat{(+)} \times \widehat{(+)}) \cdot \langle \widehat{(*)} \times \widehat{(*)}, \pi_2 \times \pi_2 \rangle\ ((a, b), (c, d)) \\ &\equiv \{ \text{Def-split (76) e Natural-}\pi_2\ (13)\ (2\ \text{vezes}) \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle\ ((\widehat{(+)} \times \widehat{(+))})\ ((\widehat{(*)} \times \widehat{(*)})\ ((a, b), (c, d)), (\pi_2 \times \pi_2)\ ((a, b), (c, d)))) \\ &\equiv \{ \text{Def-X (77)} \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle\ ((\widehat{(+)} \times \widehat{(+))})\ ((\widehat{(*)}\ (a, b), \widehat{(*)}\ (c, d)), (\pi_2\ (a, b), \pi_2\ (c, d)))) \\ &\equiv \{ \text{Uncurry (84), Definição de } * \text{ (multiplicação) e Natural-}\pi_2\ (13) \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle\ ((\widehat{(+)} \times \widehat{(+))})\ ((a * b, c * d), (b, d))) \\ &\equiv \{ \text{Def-split (76), Uncurry (84) e Definição da soma} \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= \langle \widehat{(\prime)}, \pi_2 \rangle\ (a * b + c * d, b + d) \\ &\equiv \{ \text{Def-split (76), Uncurry (84), Definição da divisão e Natural-p2 (13)} \} \\ final\ ((a, b), (c, d)) &= ((a * b + c * d) / (b + d), b + d) \end{aligned}$$

Chegando assim:

$$final\ ((a, b), (c, d)) = ((a * b + c * d) / (b + d), b + d)$$

O diagrama correspondente à função **avgLTree** é o seguinte:

$$\begin{array}{ccc} LTree\ A & \xrightarrow{outLtree} & A + ((LTree\ A) \times (LTree\ A)) \\ avgLTree \downarrow & & \downarrow id + (gene \times gene) \\ A & \xleftarrow{\pi_1 \cdot gene} & A + ((A \times A) \times (A \times A)) \end{array}$$

## Problema 5

Inserir em baixo o código F# desenvolvido, entre `\begin{verbatim}` e `\end{verbatim}`: