

# Projeto de Compiladores 2018/19

## Compilador para a linguagem deiGo

20 de março de 2019

Este projeto consiste no desenvolvimento de um compilador para a linguagem deiGo, que é um subconjunto da linguagem Go (<https://golang.org/ref/spec>) de acordo com a especificação de maio de 2018.

Na linguagem deiGo é possível usar variáveis e literais dos tipos `string`, `bool`, `int` e `float32` (estes dois últimos com sinal). A linguagem deiGo inclui expressões aritméticas e lógicas, instruções de atribuição, operadores relacionais, e instruções de controlo (`if-else` e `for`). Inclui também funções com os tipos de dados já referidos e ainda o tipo especial `[]string`, sendo a passagem de parâmetros sempre feita por valor.

A função `main()` invocada no início de cada programa é declarada na `package main` e não recebe argumentos nem retorna qualquer valor. O programa `package main; func main() {}`; é dos mais pequenos possíveis na linguagem deiGo. Os programas podem ler e escrever caracteres na consola com as funções pré-definidas `strconv.Atoi(os.Args[...])` e `fmt.Println(...)`, respetivamente.

O significado de um programa na linguagem deiGo será o mesmo que na linguagem Go, assumindo a pré-definição das funções `strconv.Atoi(...)` e `fmt.Println(...)`, bem como da variável `os.Args[...]`. Por fim, são aceites comentários nas formas `/* ... */` e `// ...` que deverão ser ignorados. Assim, por exemplo, o programa que se segue calcula o fatorial de um número passado como argumento:

```
package main;

func factorial(n int) int {
    if n == 0 {
        return 1;
    };
    return n * factorial(n-1);
};

func main() {
    var argument int;
    argument, _ = strconv.Atoi(os.Args[1]);
    fmt.Println(factorial(argument));
};
```

Este programa declara uma variável `argument` do tipo `int` e atribui-lhe o valor inteiro do argumento passado ao programa, usando a função `Atoi` para realizar a conversão (esta função retorna um par de valores e o segundo valor é descartado). De seguida, calcula o fatorial desse valor e invoca a função `Println` para escrever o resultado na consola.

# 1 Metas e avaliação

O projeto está estruturado em quatro metas encadeadas, nas quais o resultado de cada meta é o ponto de partida para a meta seguinte. As datas e as ponderações são as seguintes:

1. Análise lexical (19%) – 4 de março de 2019
2. Análise sintática (25%) – 29 de março de 2019 (meta de avaliação)
3. Análise semântica (25%) – 29 de abril de 2019
4. Geração de código (25%) – 24 de maio de 2019 (meta de avaliação)

A entrega final será acompanhada de um relatório que tem um peso de 6% na avaliação. Para além disso, a entrega final do trabalho deverá ser feita através do Inforestudante, até ao dia seguinte ao da Meta 4, e incluir todo o código-fonte produzido no âmbito do projeto (exatamente os mesmos arquivos .zip que tiverem sido colocados no MOOSHAK em cada meta).

O trabalho será verificado no MOOSHAK, em cada uma das metas, usando um concurso criado para o efeito. A classificação final da Meta 1 é obtida em conjunto com a Meta 2 e a classificação final da Meta 3 é obtida em conjunto com a Meta 4. O nome do grupo a registar no MOOSHAK deverá ser obrigatoriamente da forma “uc2019123456\_uc2019654321” usando os números de estudante como identificação do grupo na página <http://mooshak2.dei.uc.pt/~comp2019> na qual o MOOSHAK está acessível.

## 1.1 Defesa e grupos

O trabalho será realizado por grupos de dois alunos inscritos em turmas práticas do mesmo docente. Em casos excecionais, a confirmar com o docente, admite-se trabalhos individuais. A defesa oral do trabalho será realizada em grupo entre os dias 27 de maio e 7 de junho de 2019. A nota final do projeto diz respeito à prestação individual na defesa e está limitada pela soma ponderada das pontuações obtidas no MOOSHAK em cada uma das metas. Assim, a classificação final nunca poderá exceder a pontuação obtida no MOOSHAK acrescida da classificação do relatório final. Os programas de teste colocados por cada estudante no repositório <https://git.dei.uc.pt/rbarbosa/Comp2019/tree/master> serão contabilizados na avaliação. Aplica-se mínimos de 40% à nota final após a defesa.

# 2 Meta 1 – Analisador lexical

Nesta primeira meta deve ser programado um analisador lexical para a linguagem deiGo. A programação deve ser feita em linguagem C utilizando a ferramenta *lex*. Os “tokens” a ser considerados pelo compilador são apresentados de seguida e deverão estar de acordo com a especificação da linguagem Go, disponível em [https://golang.org/ref/spec#Lexical\\_elements](https://golang.org/ref/spec#Lexical_elements) e no material de apoio da disciplina.

## 2.1 Tokens da linguagem deiGo

ID: sequências alfanuméricas começadas por uma letra, onde o símbolo “\_” conta como uma letra. Letras maiúsculas e minúsculas são consideradas letras diferentes.

INTLIT: é uma sequência de dígitos que representa uma constante inteira. Existe a opção de adicionar um prefixo para especificar outra base que não a decimal: 0 para octal, 0x ou 0X para hexadecimal. Nesta última, as letras (a-f) e (A-F) correspondem aos valores entre 10 e 15.

REALIT: uma parte inteira seguida de um ponto, opcionalmente seguido de uma parte fracionária e/ou de um expoente; ou um ponto seguido de uma parte fracionária, opcionalmente seguida de um expoente; ou uma parte inteira seguida de um expoente. O expoente consiste numa das letras “e” ou “E” seguida de um número opcionalmente precedido de um dos sinais “+” ou “-”. Tanto a parte inteira como a parte fracionária e o número do expoente consistem em sequências de dígitos decimais.

STRLIT: uma sequência de caracteres (excepto “carriage return”, “newline”, ou aspas duplas) e/ou “sequências de escape” entre aspas duplas. Apenas as sequências de escape \f, \n, \r, \t, \\ e \" são definidas pela linguagem. Sequências de escape não definidas devem dar origem a erros lexicais, como se detalha mais adiante.

SEMICOLON = “;”

BLANKID = “\_”

PACKAGE = “package”

RETURN = “return”

AND = “&&”

ASSIGN = “=”

STAR = “\*”

COMMA = “,”

DIV = “/”

EQ = “==”

GE = “>=”

GT = “>”

LBRACE = “{”

LE = “<=”

LPAR = “(”

LSQ = “[”

LT = “<”

MINUS = “-”

MOD = “%”

NE = “!=”

NOT = “!”

OR = “||”

PLUS = “+”

RBRACE = “}”

RPAR = “)”

RSQ = “]”

ELSE = “else”

FOR = “for”

IF = “if”

VAR = “var”

INT = “int”

FLOAT32 = “float32”

BOOL = “bool”

STRING = “string”

PRINT = “fmt.Println”

PARSEINT = “strconv.Atoi”

FUNC = “func”

CMDARGS = “os.Args”

RESERVED: palavras reservadas da linguagem Go não utilizadas em deiGo bem como o operador de incremento (“++”) e o operador de decremento (“--”).

## 2.2 Programação do analisador

O analisador deverá chamar-se `gocompiler`, ler o ficheiro a processar através do *stdin* e, quando invocado com a opção `-l`, deve emitir os tokens e as mensagens de erro para o *stdout* e terminar. Na ausência de qualquer opção, deve escrever no *stdout* apenas as mensagens de erro. Por exemplo, caso o ficheiro `factorial.dgo` contenha o programa de exemplo dado anteriormente, que calcula o fatorial de números, a invocação:

```
./gocompiler -l < factorial.dgo
```

deverá imprimir a correspondente sequência de tokens no ecrã. Neste caso:

```
PACKAGE
ID(main)
SEMICOLON
FUNC
ID(factorial)
LPAR
ID(n)
INT
RPAR
INT
LBRACE
...
```

Figura 1: Exemplo de output do analisador lexical. O output completo está disponível em: <https://git.dei.uc.pt/rbarbosa/Comp2019/blob/master/meta1/factorial.out>

O analisador deve aceitar (e ignorar) como separador de tokens o espaço em branco (espaços, tabs e mudanças de linha), bem como comentários dos tipos `// ...` e `/* ... */`. Deve ainda detetar a existência de quaisquer erros lexicais no ficheiro de entrada. Sempre que um token possa admitir mais do que um valor semântico, o valor encontrado deve ser impresso entre parêntesis logo a seguir ao nome do token, como exemplificado na figura acima para `ID`.

Em `deiGo`, o “;” é utilizado como terminador em muitas situações. No entanto, a linguagem permite que grande parte destes “;” sejam omitidos. Para isso, quando o programa está a ser analisado lexicalmente é emitido, de forma automática, um token `SEMICOLON` sempre que o último token de uma linha seja:

- um `ID`
- um literal `INTLIT`, `REALLIT` ou `STRLIT`
- o símbolo `RETURN`
- ou um dos operadores de pontuação `RPAR`, `RSQ` ou `RBRACE`

## 2.3 Tratamento de erros

Caso o ficheiro contenha erros lexicais, o programa deverá imprimir exatamente uma das seguintes mensagens no *stdout*, consoante o caso:

```
Line <num linha>, column <num coluna>: unterminated comment\n
Line <num linha>, column <num coluna>: illegal character (<c>)\n
Line <num linha>, column <num coluna>: unterminated string literal\n
Line <num linha>, column <num coluna>: invalid escape sequence (<c>)\n
```

onde <num linha> e <num coluna> devem ser substituídos pelos valores correspondentes ao *início* do token que originou o erro, e <c> devem ser substituídos por esse token. O analisador deve recuperar da ocorrência de erros lexicais a partir do *fim* desse token. Tanto as linhas como as colunas são numeradas a partir de 1.

## 2.4 Entrega da Meta 1

O ficheiro *lex* a entregar deverá obrigatoriamente listar os autores num comentário colocado no topo desse ficheiro, contendo o nome e o número de estudante de cada elemento do grupo. Esse ficheiro deverá chamar-se *gocompiler.l* e ser enviado num arquivo de nome *gocompiler.zip*, que não deverá ter quaisquer diretorias.

O trabalho deverá ser verificado no MOOSHAK, usando o concurso criado especificamente para o efeito e cuja página está acima indicada na Secção 1. Será tida em conta apenas a última submissão ao problema A desse concurso. Os restantes problemas destinam-se a ajudar na validação do analisador. No entanto, o MOOSHAK não deve ser utilizado como ferramenta de depuração. Os estudantes deverão usar e contribuir para o repositório que está disponível em <https://git.dei.uc.pt/rbarbosa/Comp2019/tree/master> contendo casos de teste.

## 3 Meta 2 – Analisador sintático

O analisador sintático deve ser programado em C utilizando as ferramentas `lex` e `yacc`. A gramática que se segue especifica a sintaxe da linguagem `deiGo`.

### 3.1 Gramática inicial em notação EBNF

```
Program → PACKAGE ID SEMICOLON Declarations
Declarations → {VarDeclaration SEMICOLON | FuncDeclaration SEMICOLON}
VarDeclaration → VAR VarSpec
VarDeclaration → VAR LPAR VarSpec SEMICOLON RPAR
VarSpec → ID {COMMA ID} Type
Type → INT | FLOAT32 | BOOL | STRING
FuncDeclaration → FUNC ID LPAR [Parameters] RPAR [Type] FuncBody
Parameters → ID Type {COMMA ID Type}
FuncBody → LBRACE VarsAndStatements RBRACE
VarsAndStatements → VarsAndStatements [VarDeclaration | Statement] SEMICOLON | ε
Statement → ID ASSIGN Expr
Statement → LBRACE {Statement SEMICOLON} RBRACE
Statement → IF Expr LBRACE {Statement SEMICOLON} RBRACE [ELSE LBRACE {Statement SEMICOLON} RBRACE]
Statement → FOR [Expr] LBRACE {Statement SEMICOLON} RBRACE
Statement → RETURN [Expr]
Statement → FuncInvocation | ParseArgs
Statement → PRINT LPAR (Expr | STRLIT) RPAR
ParseArgs → ID COMMA BLANKID ASSIGN PARSEINT LPAR CMDARGS LSQ Expr RSQ RPAR
FuncInvocation → ID LPAR [Expr {COMMA Expr}] RPAR
Expr → Expr (OR | AND) Expr
Expr → Expr (LT | GT | EQ | NE | LE | GE) Expr
Expr → Expr (PLUS | MINUS | STAR | DIV | MOD) Expr
Expr → (NOT | MINUS | PLUS) Expr
Expr → INTLIT | REALLIT | ID | FuncInvocation | LPAR Expr RPAR
```

A gramática apresentada é ambígua e está escrita em notação EBNF, onde [...] significa “opcional” e {...} significa “zero ou mais repetições”. Portanto, a gramática deverá ser modificada para permitir a análise sintática ascendente com o `yacc`. Será necessário ter em conta as regras

de associação dos operadores e as precedências, entre outros aspetos, de modo a garantir a compatibilidade entre as linguagens deiGo e Go.

## 3.2 Programação do analisador

O analisador deverá chamar-se `gocompiler`, ler o ficheiro a processar através do *stdin* e emitir todos os resultados para o *stdout*. Quando invocado com a opção `-t` deve imprimir a árvore de sintaxe tal como se especifica nas secções seguintes. Para manter a compatibilidade com a fase anterior, se o analisador for invocado com a opção `-l` deverá realizar apenas a análise lexical, emitir os tokens e as mensagens de erro para o *stdout* e terminar.

Se não for passada qualquer opção, o analisador deve apenas escrever no *stdout* as mensagens de erro correspondentes aos erros lexicais e de sintaxe.

## 3.3 Tratamento e recuperação de erros

Caso o ficheiro de entrada contenha erros lexicais, o programa deverá imprimir no *stdout* as mensagens já especificadas na meta 1 e continuar. Caso sejam encontrados erros de sintaxe, o analisador deve imprimir mensagens de erro com o seguinte formato:

```
Line <num linha>, column <num coluna>: syntax error: <token>\n
```

onde `<num linha>`, `<num coluna>` e `<token>` devem ser substituídos pelos números de linha e de coluna, e pelo valor semântico do token que dá origem ao erro. Isto pode ser conseguido escrevendo a função:

```
void yyerror (char *s) {  
    printf ("Line %d, column %d: %s: %s\n", <num linha>,  
           <num coluna>, s, yytext);  
}
```

O analisador deve ainda incluir recuperação local de erros de sintaxe através da adição das seguintes regras de erro à gramática (ou de outras com o mesmo efeito dependendo das alterações que a gramática dada vier a sofrer):

```
Statement → error  
ParseArgs → ID COMMA BLANKID ASSIGN PARSEINT LPAR error RPAR  
FuncInvocation → ID LPAR error RPAR  
Expression → LPAR error RPAR
```

## 3.4 Árvore de sintaxe abstrata (AST)

Caso seja feita a seguinte invocação:

```
./gocompiler -t < factorial.dgo
```

deverá gerar a árvore de sintaxe abstrata correspondente e imprimi-la no *stdout* de acordo com a descrição que se segue. A árvore de sintaxe abstrata só deverá ser impressa se não houver erros de sintaxe. Caso haja erros lexicais que não causem também erros de sintaxe, a árvore deverá ser impressa imediatamente a seguir às correspondentes mensagens de erro.



As árvores de sintaxe abstrata geradas durante a análise sintática devem incluir apenas nós dos tipos indicados abaixo. Entre parêntesis à frente de cada nó indica-se o número de filhos desse nó e, onde necessário, também o tipo de filhos.

### Nó raiz

Program ( $\geq 1$ ) (<variable and/or function declarations>)

### Declaração de variáveis

VarDecl (<typespec> Id)

### Declaração/definição de Funções

FuncDecl(2) (FuncHeader FuncBody)

FuncHeader( $\geq 2$ ) (Id [<typespec>] FuncParams)

FuncParams( $\geq 0$ ) (ParamDecl)

FuncBody( $\geq 0$ ) (<declarations> | <statements>)

ParamDecl(2) (<typespec> Id)

### Statements

Block( $\geq 0$ ) If(3) For([Expr] Block) Return( $\geq 0$ ) Call( $\geq 1$ ) Print(1) ParseArgs(2)

### Operadores

Or(2) And(2) Eq(2) Ne(2) Lt(2) Gt(2) Le(2) Ge(2) Add(2) Sub(2) Mul(2) Div(2) Mod(2)  
Not(1) Minus(1) Plus(1) Assign(2) Call( $\geq 1$ )

### Terminais

Int, Float32, Bool, String, IntLit, RealLit, Id, StrLit

**Nota:** Não deverão ser gerados nós supérfluos, nomeadamente Block com menos de dois statements no seu interior, exceto para representar um statement obrigatório que seja vazio (e.g., if). Os nós Program, FuncParams e FuncBody não deverão ser considerados redundantes mesmo que tenham menos de dois nós filhos.

No caso do programa `package main; func main() {}`; o resultado deve ser:

```
Program
..FuncDecl
....FuncHeader
.....Id(main)
.....FuncParams
....FuncBody
```

Figura 2: Exemplo de output do analisador sintático.

Para o caso do programa que calcula o fatorial de um número, na primeira página, encontra-se em <https://git.dei.uc.pt/rbarbosa/Comp2019/blob/master/meta2/factorial.out> o output completo da análise sintática.

### 3.5 Desenvolvimento do analisador

Sugere-se que desenvolva o analisador de forma faseada. Deverá começar por re-escrever para o yacc a gramática acima apresentada de modo a detetar erros de sintaxe (isto é, inicialmente sem a árvore de sintaxe). Após terminada esta fase, e já garantindo que a gramática está correta, deverá focar-se no desenvolvimento do código necessário para a construção da árvore de sintaxe abstrata e a sua impressão para o stdout. O relatório final deverá descrever as opções tomadas na escrita da gramática, pelo que se recomenda agora a documentação dessa parte.

Para promover uma boa divisão de tarefas entre membros do grupo, sugere-se que comecem por analisar produções diferentes. Observando o não-terminal `Declarations`, um membro começaria por `Declarations`  $\rightarrow$  `{VarDeclaration SEMICOLON}` enquanto o outro começaria por `Declarations`  $\rightarrow$  `{FuncDeclaration SEMICOLON}`. Outra possibilidade seria um membro começar pelo topo da gramática, em `Program`, e o outro membro começar pela base, em `Expr`. Teriam de coordenar o trabalho a partir do momento em que chegassem a não-terminais comuns na gramática.

Deverá ter em atenção que toda a memória alocada durante a execução do analisador deve ser libertada antes deste terminar, devendo ter em conta as situações em que a construção da AST é interrompida por erros de sintaxe.

### 3.6 Submissão da Meta 2

O ficheiro *lex* entregue deverá obrigatoriamente listar os autores num comentário colocado no topo desse ficheiro, contendo o nome e o número de estudante de cada membro do grupo. Os ficheiros *lex* e *yacc* a entregar deverão chamar-se *gocompiler.l* e *gocompiler.y* e ser colocados num único arquivo com o nome *gocompiler.zip* juntamente com quaisquer outros ficheiros necessários para compilar o analisador.

O trabalho deverá ser avaliado no MOOSHAK, usando o concurso criado especificamente para o efeito e cuja página está acima indicada na Secção 1. Para efeitos de avaliação, será tida em conta apenas a última submissão ao problema A desse concurso. Os restantes problemas destinam-se a ajudar na validação do analisador, nomeadamente no que respeita à deteção de erros de sintaxe e à construção da árvore de sintaxe abstrata. No entanto, o MOOSHAK não deve ser utilizado como ferramenta de depuração. Os estudantes deverão usar e contribuir para o repositório disponível em <https://git.dei.uc.pt/rbarbosa/Comp2019/tree/master> contendo casos de teste.