



Projeto de Compiladores

2014/15– 2º semestre

Licenciatura em Engenharia Informática

UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Engenharia Informática

Data de Entrega: 1 de Junho 2015

v3.0.0

Nota Importante: Qualquer tentativa de fraude leva à reprovação à disciplina tanto do facilitador como do prevaricador.

Compilador para a linguagem mili-Pascal (mPa)

Este projeto consiste no desenvolvimento de um compilador para a linguagem “mili-Pascal,” que é um pequeno subconjunto da linguagem Pascal Standard ISO 7185:1990 com extensões relativas à passagem de parâmetros através da linha de comandos.

Nesta linguagem procedimental, os programas podem incluir dados e operações sobre esses dados. É possível utilizar variáveis e literais dos tipos lógico, inteiro e real. Também é possível usar literais do tipo cadeia de caracteres (string), mas apenas para efeitos de impressão no ecrã. A linguagem implementa expressões aritméticas e lógicas e operações relacionais simples, instruções de atribuição, de controlo (if-then-else, while-do e repeat-until) e de saída (writeln).

É possível passar parâmetros, que deverão ser literais inteiros, a um programa em mili-Pascal através da linha de comandos. Os seus valores podem ser recuperados através da construção `val(paramstr(i), v)`, que atribui o valor do *i*-ésimo parâmetro à variável *v*. O número de parâmetros pode ser obtido através da função pré-definida `paramcount`. A construção `writeln(...)` permite imprimir valores inteiros, reais (por exemplo, `1.000000000E+00`), lógicos (TRUE e FALSE), e cadeias de caracteres (por exemplo, `'Bom dia!'`). Finalmente, é possível definir funções, mas não procedimentos. São aceites (e ignorados) comentários dos tipos `(*...*)` e `{...}` (e ainda `{...*}` e `(*...}`!).

O significado de um programa em mili-Pascal será o mesmo que o seu significado em Pascal ISO 7185:1990 com a pré-definição das funções `paramcount`, `paramstr` e do procedimento `val`. Por exemplo, o seguinte programa deverá imprimir o valor do primeiro argumento passado na linha de comandos:

```
program echo(output);  
var x: integer;  
begin  
    val(paramstr(1), x);  
    writeln(x)  
end.
```

Fases

O projeto será estruturado como uma sequência de quatro metas com ponderação e datas de entrega próprias, a saber:

1. Análise lexical (10%) – até 23 de março de 2015
2. Análise sintática (30%) – até 17 de abril de 2015
3. Análise semântica (25%) – até 4 de maio de 2015
4. Geração de código (20%) + relatório (15%) – até 1 de junho de 2015

Em cada uma das metas, o trabalho será obrigatoriamente validado no mooshak usando um concurso criado especificamente para o efeito. Para além disso, a entrega final do projeto deverá ser feita no inforestudante até às **23h59** do dia **1 de junho**, e incluir:

- Todo o código fonte produzido no âmbito do projeto (*exatamente* os mesmos zip que tiverem sido submetidos atempadamente ao mooshak em cada meta, bem como os que, eventualmente, tiverem sido submetidos às pós-metas) e o login utilizado no mooshak.
- O relatório, que deverá descrever a estratégia de implementação adotada, detalhando aspetos como a especificação das categorias lexicais e da gramática concreta utilizada, a construção da árvore de sintaxe abstrata, o formato interno da tabela de símbolos, o tratamento de erros lexicais, sintáticos e semânticos, o acesso aos parâmetros de entrada, a geração de código, etc.

Defesa e grupos

O trabalho será normalmente realizado por grupos de dois alunos, admitindo-se também que o seja a título individual. A **defesa oral** do trabalho será **individual** e terá lugar entre os dias **8 e 12 de junho de 2015**. A nota da defesa (entre 0 e 100%) multiplica pela média ponderada das pontuações obtidas no mooshak e no relatório à data de entrega de cada uma das metas. *Excecionalmente*, e por motivos justificados (como, por exemplo, falha técnica), poderão ser atribuídas notas superiores a 100% na defesa, mas a classificação final nunca poderá exceder a pontuação obtida no mooshak para as diversas fases à data da última entrega.

Aplicam-se mínimos de 47,5% à nota final após a defesa.

Fase I – Analisador lexical

O analisador lexical deve ser implementado em C utilizando a ferramenta `lex`. Os tokens da linguagem são apresentados de seguida.

NOTA: Em Pascal, não é feita qualquer distinção entre letras maiúsculas e minúsculas, salvo quando estas ocorrem no interior de cadeias de caracteres. Onde a seguir se usam letras minúsculas, também se devem considerar as correspondentes maiúsculas.

Tokens da linguagem mili-Pascal

ID : sequências alfanuméricas começadas por uma letra.

INTLIT : sequências de dígitos decimais.

REALLIT : sequências de dígitos decimais interrompidas por um único ponto e opcionalmente seguidas de um expoente, *ou* sequências de dígitos decimais seguidas de um expoente. O expoente consiste na letra “e”, opcionalmente seguida de um sinal de + ou de - , seguida de uma sequência de dígitos decimais.

STRING : Sequências de caracteres (excluindo mudanças de linha) iniciadas por uma aspa simples (') e terminadas pela primeira ocorrência de uma aspa simples que não seja seguida imediatamente por outra aspa simples. Por exemplo, “ ' abc ' ” e “ ' texto entre ' ' aspas ' ' ”.

ASSIGN = " :="

BEGIN = "begin"

COLON = " :"

COMMA = " ,"

DO = "do"

DOT = " ."

ELSE = "else"

END = "end"

FORWARD = "forward"

FUNCTION = "function"

IF = "if"

LBRAC = "("

NOT = "not"

OUTPUT = "output"

PARAMSTR = "paramstr"

PROGRAM = "program"

RBRAC = ")"

REPEAT = "repeat"

SEMIC = " ;"

THEN = "then"

UNTIL = "until"

VAL = "val"

VAR = "var"

WHILE = "while"

WRITELN = "writeln"

OP1 = "and" | "or"

OP2 = "<" | ">" | "=" | "<=" | ">="

OP3 = "+" | "-"

OP4 = "*" | "/" | "mod" | "div"

RESERVED : palavras reservadas e identificadores requeridos do Pascal standard não usados. NOTA: os identificadores requeridos `boolean`, `false`, `integer`, `real` e `true` serão usados em fases posteriores do projeto, e não deverão ser RESERVED.

Implementação

O analisador deverá chamar-se `mpascanner`, ler o ficheiro a processar através do `stdin`, e emitir o resultado da análise para o `stdout`. Caso o ficheiro `echo.mpa` contenha o programa de exemplo dado anteriormente, a invocação:

```
./mpascanner < echo.mpa
```

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

```
PROGRAM
ID(echo)
LBRAC
OUTPUT
RBRAC
SEMIC
VAR
ID(x)
COLON
ID(integer)
SEMIC
BEGIN
VAL
LBRAC
PARAMSTR
LBRAC
INTLIT(1)
RBRAC
COMMA
ID(x)
RBRAC
SEMIC
WRITELN
LBRAC
ID(x)
RBRAC
END
DOT
```

O analisador deve aceitar (e ignorar) como separador de tokens espaço em branco (espaços, tabs e mudanças de linha), bem como comentários iniciados por `(*` ou `{` e terminados pela primeira ocorrência de `*)` ou `}`. 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 se exemplificou acima para `ID` e `INTLIT`.

Tratamento de erros

Caso o ficheiro de entrada contenha erros lexicais, o programa deverá imprimir uma das seguintes mensagens no `stdout`, conforme o caso:

- "Line <num linha>, col <num coluna>: illegal character ('<c>')\n"
- "Line <num linha>, col <num coluna>: unterminated string\n"
- "Line <num linha>, col <num coluna>: unterminated comment\n"

onde <c>, <num linha> e <num coluna> devem ser substituídos pelos valores correspondentes ao *início* do token que originou o erro. O analisador deve recuperar da ocorrência de erros lexicais a partir do *fim* desse token.

Submissão

O trabalho deverá ser validado no mooshak, usando o concurso criado especificamente para o efeito em <http://mooshak2.dei.uc.pt/~comp2015>. 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 debug!

O ficheiro lex a submeter deve chamar-se `mpascanner.l` e ser colocado num ficheiro zip com o nome `mpascanner.zip`. O ficheiro zip não deve conter quaisquer diretórios.

Fase II – Analisador sintático

O analisador sintático deve ser implementado em C utilizando as ferramentas `lex` e `yacc`. A gramática seguinte define a sintaxe da linguagem `miliPascal`.

Gramática inicial em notação EBNF

Prog → ProgHeading SEMIC ProgBlock DOT
ProgHeading → PROGRAM ID LBRAC OUTPUT RBRAC
ProgBlock → VarPart FuncPart StatPart
VarPart → [VAR VarDeclaration SEMIC { VarDeclaration SEMIC }]
VarDeclaration → IDList COLON ID
IDList → ID { COMMA ID }
FuncPart → { FuncDeclaration SEMIC }
FuncDeclaration → FuncHeading SEMIC FORWARD
FuncDeclaration → FuncIdent SEMIC FuncBlock
FuncDeclaration → FuncHeading SEMIC FuncBlock
FuncHeading → FUNCTION ID [FormalParamList] COLON ID
FuncIdent → FUNCTION ID
FormalParamList → LBRAC FormalParams { SEMIC FormalParams } RBRAC
FormalParams → [VAR] IDList COLON ID
FuncBlock → VarPart StatPart
StatPart → CompStat
CompStat → BEGIN StatList END
StatList → Stat { SEMIC Stat }
Stat → CompStat
Stat → IF Expr THEN Stat [ELSE Stat]
Stat → WHILE Expr DO Stat
Stat → REPEAT StatList UNTIL Expr
Stat → VAL LBRAC PARAMSTR LBRAC Expr RBRAC COMMA ID RBRAC
Stat → [ID ASSIGN Expr]
Stat → WRITELN [WritelnPList]
WritelnPList → LBRAC (Expr | STRING) { COMMA (Expr | STRING) } RBRAC
Expr → Expr (OP1 | OP2 | OP3 | OP4) Expr
Expr → (OP3 | NOT) Expr
Expr → LBRAC Expr RBRAC
Expr → INTLIT | REALLIT
Expr → ID [ParamList]
ParamList → LBRAC Expr { COMMA Expr } RBRAC

Uma vez que a gramática dada é ambígua e é apresentada em notação EBNF, onde [...] representa “opcional” e {...} representa “zero ou mais repetições,” esta deverá ser modificada para permitir a análise sintática ascendente com o `yacc`. Será necessário ter em conta a precedência e as regras de associação dos operadores, entre outros aspetos, de modo a garantir a compatibilidade entre as linguagens `miliPascal` e `Pascal`.

O analisador deverá chamar-se `mpaparser`, ler o ficheiro a processar através do `stdin`, e detetar a existência de quaisquer erros lexicais ou de sintaxe no ficheiro de entrada.

Tratamento de erros

Caso o ficheiro de entrada contenha erros lexicais, o programa deverá imprimir no `stdout` as mensagens definidas na Fase I, e continuar. Caso seja encontrado um erro de sintaxe, o analisador deve imprimir uma mensagem de erro e parar. A mensagem a imprimir será

- "Line <num linha>, col <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 definindo a função:

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

Árvore de sintaxe abstrata

Caso o ficheiro `gcd.mpa` contenha o programa:

```
program gcd(output);  
var a, b: integer;  
begin  
    val(paramstr(1), a);  
    val(paramstr(2), b);  
    if a = 0 then  
        writeln(b)  
    else  
        begin  
            while b > 0 do  
                if a > b then  
                    a := a - b  
                else  
                    b := b - a;  
                writeln(a)  
            end  
        end  
end.
```

a invocação

```
./mpaparser -t < gcd.mpa
```

deverá gerar a árvore de sintaxe abstrata correspondente, imprimi-la no `stdout` conforme a seguir se explica, e terminar. 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.

Programa

```
Program(4)          ( Id VarPart FuncPart <statement> )
VarPart(>=0)        ( { VarDecl } )
FuncPart(>=0)        ( { FuncDecl | FuncDef | FuncDef2 } )
```

Declaração de variáveis

```
VarDecl(>=2)        ( Id {Id} Id )      /* último Id é o tipo */
```

Declaração de funções

```
FuncDecl(3)          ( Id FuncParams Id )
FuncDef(5)            ( Id FuncParams Id VarPart <statement> )
FuncDef2(3)           ( Id VarPart <statement> )
FuncParams(>=0)       ( { Params | VarParams } )
Params(>=2)           ( Id {Id} Id )
VarParams(>=2)        ( Id {Id} Id )
```

Statements

```
Assign(2) IfElse(3) Repeat(2) StatList(>=0) ValParam(2)
While(2) WriteLn(>=0)
```

Operações

```
Add(2) And(2) Call(>=2) Div(2) Eq(2) Geq(2) Gt(2) Leq(2) Lt(2)
Minus(1) Mod(2) Mul(2) Neq(2) Not(1) Or(2) Plus(1) RealDiv(2) Sub(2)
```

Terminais

```
Id IntLit RealLit String
```

Nota: não deverão ser gerados nós supérfluos, nomeadamente StatList com menos de dois *statements* no seu interior, salvo quando um *statement* requerido por algum nó for o *statement* vazio.

No caso do programa dado, o resultado deve ser:

```
Program
..Id(gcd)
..VarPart
....VarDecl
.....Id(a)
.....Id(b)
.....Id(integer)
..FuncPart
..StatList
....ValParam
.....IntLit(1)
.....Id(a)
....ValParam
.....IntLit(2)
.....Id(b)
....IfElse
.....Eq
.....Id(a)
.....IntLit(0)
.....WriteLn
.....Id(b)
```



```

.....StatList
.....While
.....Gt
.....Id(b)
.....IntLit(0)
.....IfElse
.....Gt
.....Id(a)
.....Id(b)
.....Assign
.....Id(a)
.....Sub
.....Id(a)
.....Id(b)
.....Assign
.....Id(b)
.....Sub
.....Id(b)
.....Id(a)
.....WriteLn
.....Id(a)

```

Desenvolvimento do analisador

Sugere-se que o desenvolvimento do analisador seja efetuado em duas fases. A primeira deverá visar a tradução da gramática para o `yacc` de modo a permitir detetar e reportar eventuais erros de sintaxe. A segunda deverá incidir sobre a construção da árvore de sintaxe abstrata e sua impressão na saída.

Submissão

O trabalho deverá ser validado no mooshak, usando o concurso criado especificamente para o efeito em <http://mooshak2.dei.uc.pt/~comp2015>. Como na fase anterior, 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, de acordo com a estratégia de desenvolvimento proposta.

Os ficheiros `lex` e `yacc` a submeter devem chamar-se `mpaparser.l` e `mpaparser.y` e ser colocados juntamente com quaisquer ficheiros adicionais necessários à compilação do analisador num único ficheiro zip com o nome `mpaparser.zip`. O ficheiro zip não deve conter quaisquer diretórios.

Fase III – Análise semântica

A análise semântica da linguagem `miliPascal` deve ser implementada em C utilizando as ferramentas `lex` e `yacc` tendo por base o analisador sintático desenvolvido na fase anterior. O analisador deverá chamar-se `mpasemantic`, ler o ficheiro a processar através do `stdin`, e detetar a existência de quaisquer erros (lexicais, de sintaxe, ou de semântica) no ficheiro de entrada. Caso o ficheiro `gcd2.mpa` contenha o programa:

```
program gcd2(output);
var x, y: integer;
function gcd(A, B: integer): integer;
begin
    if A = 0 then
        gcd := B
    else
        begin
            while B > 0 do
                if A > B then
                    A := A - B
                else
                    B := B - A;
                gcd := A
            end
        end;
    end;
begin
    if paramcount >= 2 then
        begin
            val(paramstr(1), x);
            val(paramstr(2), y);
            writeln(gcd(x, y))
        end
    else
        writeln('Error: two parameters required.')
    end.
end.
```

a invocação

```
./mpasemantic < gcd2.mpa
```

deverá levar o analisador a proceder à análise sintática do programa e, sendo este sintaticamente válido, a proceder também à análise semântica.

Por uma questão de compatibilidade com a fase anterior, a invocação

```
./mpasemantic -t < gcd2.mpa
```

deverá gerar a árvore de sintaxe abstrata correspondente, imprimi-la no `stdout` como anteriormente, e terminar *sem* proceder a análise semântica.

Sendo o programa sintática e semanticamente válido, a invocação

```
./mpasemantic -s < gcd2.mpa
```

deve levar o analisador a imprimir no `stdout` a(s) tabela(s) de símbolos

correspondentes, como a seguir se especifica. Caso sejam passadas ambas as opções (-t e -s), a árvore de sintaxe abstrata deve ser impressa primeiro, seguida de uma linha em branco e da(s) tabela(s) de símbolos.

Tabelas de símbolos

Durante a análise semântica, deve ser construída uma tabela de símbolos para cada *região* (programa ou função) do programa de entrada, incluindo uma tabela exterior contendo os identificadores requeridos `boolean`, `integer`, `real`, `false` e `true`, o identificador da função pré-definida `paramcount` (que implementará o acesso ao número de parâmetros passados na linha de comandos), e uma referência ao próprio programa. Por sua vez, a tabela correspondente ao programa irá conter os identificadores das variáveis e funções nele declaradas e definidas, respetivamente. Finalmente, as tabelas correspondentes às funções irão conter o próprio identificador da função (enquanto valor de retorno) e os identificadores dos respetivos parâmetros formais e variáveis locais. De notar que o nome do programa não tem significado para o próprio programa, pelo que não figura em qualquer tabela! Todos os identificadores a inserir nas tabelas devem ser previamente convertidos para minúsculas.

Para o programa dado, as tabelas de símbolos a imprimir são as seguintes:

```
===== Outer Symbol Table =====
boolean      _type_      constant      _boolean_
integer      _type_      constant      _integer_
real         _type_      constant      _real_
false       _boolean_    constant      _false_
true        _boolean_    constant      _true_
paramcount   _function_
program      _program_

===== Function Symbol Table =====
paramcount   _integer_    return

===== Program Symbol Table =====
x            _integer_
y            _integer_
gcd          _function_

===== Function Symbol Table =====
gcd          _integer_    return
a            _integer_    param
b            _integer_    param
```

Os símbolos (e as tabelas) devem ser apresentados por ordem de declaração no programa fonte. O formato das linhas é “Name\tType[\tFlag[\tValue]]”. Consideram-se pré-definidos os tipos `_boolean_`, `_integer_` e `_real_`, os pseudo-tipos `_function_`, `_program_` e `_type_`, e ainda os valores booleanos `_false_` e `_true_`. A palavra `constant` é usada para indicar que o identificador é uma constante com um valor pré-definido (que não pode ser modificado, por exemplo, por atribuição), e as palavras `return`, `param` e `varparam` são usadas para indicar o valor de retorno e os parâmetros formais das funções (a passar por valor e por referência), respetivamente. Deve ser deixada uma linha em branco entre tabelas consecutivas.

Tratamento de erros semânticos

Eventuais erros de semântica deverão ser detetados e reportados no `stdout` de acordo com o catálogo de erros abaixo, onde cada mensagem deve ser antecedita pelo prefixo “Line <linha>, col <coluna>: ” e terminada com um caracter de fim de linha.

```
Cannot write values of type <type>
Function identifier expected
Incompatible type for argument <num> in call to function <token> (got
<type>, expected <type>)
Incompatible type in assignment to <token> (got <type>, expected
<type>)
Incompatible type in <statement> statement (got <type>, expected
<type>)
Operator <token> cannot be applied to type <type>
Operator <token> cannot be applied to types <type>, <type>
Symbol <token> already defined
Symbol <token> not defined
Type identifier expected
Variable identifier expected
Wrong number of arguments in call to function <token> (got <type>,
expected <type>)
```

Caso seja detetado algum erro durante a análise semântica do programa, o analisador deverá terminar com a mensagem de erro apropriada, sem imprimir a tabela de símbolos. Os tipos de dados (<type>) a reportar nas mensagens de erro deverão ser os mesmos usados na impressão das tabelas de símbolos, e todos os tokens (<token>) deverão ser apresentados tal como aparecem no código fonte (sem conversão para minúsculas). Relativamente aos statements (<statement>), deverão ser usadas as designações `if`, `while`, `repeat-until` e `val-paramstr`, em minúsculas.

Os números de linha e coluna a reportar dizem respeito ao primeiro caracter dos seguintes tokens:

- O identificador que dá origem ao erro
- O operador cujos argumentos são de tipos incompatíveis
- O operador ou o identificador da função invocada correspondente à raiz da AST da expressão que é incompatível com a forma como é usada
- O identificador da função invocada quando o número de parâmetros estiver errado

Desenvolvimento do analisador

Sugere-se que o desenvolvimento do analisador seja efetuado em duas fases. A primeira deverá consistir na construção das tabelas de símbolos e sua impressão, e a segunda no tratamento de erros semânticos.

Submissão

O trabalho deverá ser validado no mooshak, usando o concurso criado especificamente para o efeito em <http://mooshak2.dei.uc.pt/~comp2015>. Como nas fases anteriores, 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 construção das tabelas de símbolos e à deteção de erros de semântica, de acordo com a estratégia de desenvolvimento proposta.

Os ficheiros `lex` e `yacc` a submeter devem chamar-se `mpasemantic.l` e `mpasemantic.y` e ser colocados juntamente com quaisquer ficheiros adicionais necessários à compilação do analisador num único ficheiro zip com o nome `mpasemantic.zip`. O ficheiro zip não deve conter quaisquer diretórios.