



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

# Compilador para Pascal Standard

---

## Projeto de Processamento de Linguagens

### Membros do Grupo

- Afonso Sousa - a104262
- Edgar Pinto - a104081
- Luís França - a104259

*Ano Letivo: 2024/2025*

## Índice

---

1. Introdução
2. Arquitetura
3. Análise Léxica
4. Análise Sintática
5. Análise Semântica
6. Otimizações
7. Testes e validação
8. Conclusões

## Introdução

---

O presente projeto consiste na implementação de um compilador para a linguagem Pascal, desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Processamento de Linguagens. Este compilador tem como objetivo a tradução de programas escritos em Pascal para um código intermédio e, posteriormente, é gerado o código-máquina correspondente para ser executado na [máquina virtual disponibilizada pela equipa docente](#).

O compilador implementa as fases tradicionais de um processo de compilação, nomeadamente:

- **Análise Léxica:** Responsável por converter o código fonte em tokens
- **Análise Sintática:** Encarregue da construção da árvore sintática abstrata (AST)
- **Análise Semântica:** Efetua a verificação de tipos e estrutura do programa
- **Geração de Código:** Produz o código intermédio para a máquina virtual alvo

A implementação foi realizada em Python, utilizando a biblioteca `ply` (Python Lex-Yacc) para as fases de análise léxica e sintática. O compilador suporta as principais estruturas de controlo do Pascal (if-then-else, for, while), operações aritméticas, variáveis, arrays e chamadas a funções como `writeln` e `readln`.

## Arquitetura

---

O compilador está estruturado de forma modular, dividindo as responsabilidades em diferentes componentes:

1. `tokenizer.py`: Implementa o analisador léxico utilizando o módulo `lex` da biblioteca `ply`. Define os tokens da linguagem, incluindo palavras-chave, operadores, identificadores e literais.
2. `pascal_yacc.py`: Contém o analisador sintático que utiliza a gramática definida para construir a árvore sintática abstrata (AST). Cada regra de produção corresponde a uma classe em `node.py`.
3. `node.py`: Define as classes que representam os nós da AST. Cada classe contém um método `generate()` que produz o código da máquina virtual correspondente.
4. `symbol_table.py`: Implementa a tabela de símbolos que armazena informações sobre variáveis, arrays e as suas posições na stack da máquina virtual.
5. `main.py`: Programa principal que coordena o processo de compilação, lendo o código fonte Pascal, invocando o parser e gerando o código de máquina num ficheiro de saída.

O fluxo de execução do compilador começa com a leitura do código fonte, passa pela análise léxica e sintática, constrói a AST, realiza a análise semântica através da tabela de símbolos e finalmente gera o código da máquina virtual.

## Análise Léxica

---

O módulo `tokenizer.py` implementa o analisador léxico utilizando o `lex`, como referido anteriormente. Este componente é responsável por dividir o código fonte em tokens reconhecíveis pelo analisador sintático.

Tokens Implementados:

- Palavras-chave: `program`, `var`, `begin`, `end`, `if`, `then`, `else`, `while`, `for`, `to`, `downto`, etc.
- Tipos de dados: `integer`, `boolean`, `char`, `real`, `string`, `array`
- Operadores: aritméticos (+, -, \*, /), relacionais (<, >, <=, >=, =, <>), lógicos (and, or, not)
- Símbolos especiais: parêntesis, parêntesis rectos, ponto, vírgula, ponto-e-vírgula, etc.
- Identificadores: nomes de variáveis seguindo a convenção do Pascal
- Literais: números inteiros, números reais, cadeias de caracteres, caracteres, valores booleanos

Tratamento Especial:

- Comentários: Ignorados pelo lexer, tanto os delimitados por {...} como por (...)
- Espaços em branco: Ignorados pelo lexer
- Strings e caracteres: Extraídos sem as aspas delimitadoras
- Case-insensitive: O lexer foi configurado para tratar maiúsculas e minúsculas como equivalentes

- Cada token é definido através de expressões regulares ou funções específicas, permitindo o reconhecimento preciso de cada elemento da linguagem Pascal.

## Análise Sintática

---

A análise sintática é implementada no módulo `pascal_yacc.py` utilizando a biblioteca PLY (yacc). Este componente usa os tokens fornecidos pela análise léxica para construir uma árvore sintática abstrata (AST).

Definição da gramática em BNF: [Gramática](#)

### Gramática Implementada

A gramática implementada suporta:

- Estrutura básica de um programa Pascal: cabeçalho, declarações de variáveis e bloco de comandos
- Declarações de variáveis: tipos simples e arrays
- Expressões aritméticas e lógicas: com precedência correcta de operadores
- Estruturas de controlo: if-then-else, while, for
- Chamadas de função: principalmente para entrada e saída (`readln`, `writeln`)
- Arrays: declaração, acesso a elementos e atribuição

O axioma desta gramática é a produção `program`.

Da gramática implementada queremos destacar alguns casos particulares:

### Recursividade de listas

Para definir listas de valores tivemos atenção de aplicar recursividade à esquerda pelo facto do yacc ser um parser LALR.

Como exemplo demosntramos a declaração das produções `var_declarations` e `var_declaration` que aplicam esta estratégia; as restantes produções que envolvem listas (`identifiers_list`, `args_list`, etc.) seguem a mesma lógica

```
<var_declarations> -> <var_declarations> <var_declaration>
                        | <var_declaration>

<var_declaration> -> <identifiers_list> ":" <type> ";"
```

### Blocos If-Then-Else

Para definir blocos if then else aplicamos as seguintes produções:

```
<if> -> "IF" <expressionBool> "THEN" <command_list> <else>

<else> -> "ELSE" <command_list>
        | ε
```

Estas produções primeiro identificam a condição do if através da produção `expressionBool` e depois a lista de comandos através da produção `command_list` a existência ou não de um segmento `else` depende da seguinte produção que ou dá match com o terminal `ELSE` ou com `empty`.

Apesar de corretas, essas produções podem gerar um conflito shift-reduce durante a análise sintática. No entanto, por padrão, o Yacc resolve esse tipo de conflito priorizando a operação shift. Isso permite que o parser interprete corretamente estruturas condicionais com if-then-else, mesmo na presença de possíveis ambiguidades.

## Ciclos while e for

As produções referentes aos ciclos while e for são definidas da seguinte forma:

```
for : FOR IDENTIFIER ASSIGN expression to_or_downto expression DO command_list
```

Esta regra define o ciclo for, que permite iterar através de um intervalo de valores. **For**: inicia a construção do ciclo; **IDENTIFIER**: identifica a variável de controle do ciclo; **ASSIGN**: operador de atribuição para inicializar a variável de controle; **expression**: expressão que define o valor inicial da variável de controle; **to\_or\_downto**: é uma produção auxiliar que determina a direção (TO para incremento ou DOWNTO para decremento); **DO**: indica o início do bloco de comandos a serem executados no ciclo; **command\_list**: lista de comandos a serem executados em cada iteração do ciclo.

```
while : WHILE expressionBool DO command_list
```

Esta regra define o ciclo while, que executa um bloco de comandos enquanto uma condição for verdadeira. O token **WHILE** inicia a construção do ciclo, seguido pela **expressionBool** que define a condição de continuação do ciclo. O token **DO** indica o início do bloco de comandos a serem executados enquanto a condição for verdadeira, e **command\_list** representa a lista de comandos a serem executados.

## Operações Binárias

Para definir operações binárias tivemos de dividir em múltiplas regras para não gerar conflitos.

```
<expressionBool> -> <expression>
                    | <expression> <opRel> <expression>

<opRel> -> "=" | "<" | ">" | "<=" | ">" | ">="

<expression> -> <term>
                | <expression> <opAd> <term>

<opAd> -> "+" | "-" | "AND"

<term> -> <factor>
          | <term> <opMul> <factor>

<opMul> -> "*" | "/" | "DIV" | "MOD" | "OR"
```

A gramática apresentada organiza as operações em diferentes regras para tratar corretamente a precedência entre operadores aritméticos, booleanos e relacionais. A regra principal é `expressionBool`, responsável por expressões que podem conter comparações. esta produção contém a regra `expression` usada para operações de adição, subtração e conjunção, por sua vez esta regra contém `term` responsável por tratar de operações de multiplicação, divisão e disjunção.

## Tratamento da AST

Cada regra de produção na gramática está associada a uma função que constrói o nó apropriado para a AST. Por exemplo:

- `p_program`: Cria um nó Program
- `p_if`: Cria um nó If com condição, bloco then e bloco else
- `p_while`: Cria um nó While com condição e corpo
- `p_for`: Cria um nó For com inicialização, direcção (to/downto), limite e corpo

A precedência de operadores é definida explicitamente para garantir que expressões como  $a + b * c$  sejam interpretadas correctamente (multiplicação tem precedência sobre adição).

# Análise Semântica

---

A análise semântica é realizada através da interacção entre a AST e a tabela de símbolos, implementada em `symbol_table.py`. Este módulo mantém um registo de todas as variáveis declaradas, os seus tipos e posições na stack da máquina virtual.

## Verificações Implementadas

- Declaração dupla de variáveis: Erro se uma variável for declarada mais de uma vez
- Verificação de tipos: Em operações e atribuições
- Compatibilidade de tipos: Verificação automática com conversão de inteiro para real quando necessário
- Arrays: Verificação de correto acesso a elementos do array

## Tabela de Símbolos

Utilizamos um dicionário `symbols` onde cada entrada é mapeada pelo nome da variável.

- Chave: Nome da variável
- Valor: Um tuplo que pode conter:
  - Para variáveis simples: (tipo, posição na stack)
  - Para arrays: (tipo base, posição na stack, tamanho)

A propriedade `stack_pos` controla a alocação sequencial de posições na stack. Cada declaração simples consome um slot.

A tabela de símbolos armazena:

- Nome da variável
- Tipo (inteiro, real, string, array, etc.)

- Posição na stack da máquina virtual
- Informações adicionais para arrays (tipo base, intervalo, tamanho)

Esta tabela possui métodos para adicionar uma variável guardando os seus dados no dicionário, um método para obter a posição na stack de uma variável e um método de verificação de variáveis não utilizadas.

Ao declarar um array, a tabela calcula o tamanho necessário e reserva apenas uma posição na stack global para armazenar o ponteiro para o bloco de memória alocado na heap.

Operações realizadas:

#### 1. Adição de Variáveis (**add**):

- Evitar Declarações Duplicadas: Antes de adicionar uma nova variável, o método verifica se ela já existe no dicionário e, caso sim, lança um erro de declaração dupla.
- Arrays: Se o tipo informado for um dicionário com {'type': 'array', ...}, calcula o tamanho baseado no intervalo definido (ex.: de min a max) e reserva somente um slot na stack para o ponteiro do array. Os parâmetros adicionais, como range e base\_type, estão armazenados para possibilitar verificações durante o acesso e a geração de código.
- Variáveis Simples: Apenas o tipo (convertido para letras minúsculas) e a posição na stack são armazenados.

#### 2. Recuperação da Posição na stack (**get\_stack\_pos**):

- Este método permite a consulta da posição armazenada para uma variável.
- Caso a variável não esteja declarada ou ainda não tenha sido atribuída uma posição válida (posição -1), lança uma exceção ou atualiza a posição conforme necessário, garantindo que sempre exista uma referência válida para o acesso no código gerado.

#### 3. Verificação de Declarações Não Utilizadas:

- Embora simples, este método varre as declarações e pode imprimir avisos para variáveis que foram declaradas mas nunca usadas, ajudando o compilador a sugerir melhorias e otimizações no uso de memória.

## Geração de Código

---

A geração de código é realizada pelos métodos `generate()` implementados em cada classe da AST no ficheiro `node.py`. O código gerado é específico para a máquina virtual alvo, utilizando as suas instruções de stack.

Características do Código Gerado:

- Baseado em stack: A máquina virtual utiliza uma arquitetura em stack
- Alocação de memória: Variáveis globais na stack e arrays na heap
- Manipulação de arrays: Usa instruções específicas como `ALLOCN`, `STOREN`, `LOADN`
- Ajuste de índices: Conversão entre índices Pascal (podem começar em qualquer número) para índices base-0 da máquina virtual

Exemplos de instruções geradas

- Para variáveis simples: `PUSHI`, `STOREG`, `PUSHG`
- Para arrays: `ALLOCN`, `PADD`, `STOREN`, `LOADN`
- Para operações aritméticas: `ADD`, `SUB`, `MUL`, `DIV`

- Para estruturas de controlo: JZ, JUMP com etiquetas O código gerado inclui mensagens de erro apropriadas para verificações de tipo em tempo de compilação.

## Declaração de variáveis

---

No nosso compilador, a declaração de variáveis passa por vários passos. Quando o parser reconhece uma variável, envia o nome e o tipo da mesma para a tabela de símbolos e esta armazena esses valores e regista também a posição na stack para os nós depois escreverem os comandos do código-máquina com as posições corretas. Depois nas regras de produção onde o nome da variável volta a aparecer, este é passado como argumento para o nó que usa o nome para procurar os restantes dados relacionados a essa variável e realiza operações sobre a mesma.

Vale também mencionar que a declaração de variáveis é feita de forma dinâmica ao invés de estática, ou seja, estas são declaradas à medida que são usadas e não no início do programa. Uma exceção a esta regra são variáveis em arrays que são declaradas logo no início do programa.

## Nós da AST

---

Como referido na análise sintática, foi necessário associar os valores de cada regra de produção a um nó dedicado. Ou seja, no parser iniciamos o nó, para cada componente e geramos recursivamente o código-máquina. Existem alguns nós que precisam de uma explicação detalhada, sendo eles:

- **BinaryOp**: Como o nome indica, é neste nó que são realizadas as operações binárias do programa. O construtor recebe o código que está à esquerda da operação, o código que está à direita e a operação em si e liga a operação à instrução correspondente no código-máquina. Este nodo também realiza a verificação dos tipos dos argumentos fornecidos, lançando uma exceção se forem incompatíveis para a operação fornecida.
- **If**: Este nó é responsável por representar a estrutura de controlo if-then-else. O construtor recebe a condição, o bloco de comandos do then e o bloco de comandos do else. A geração de código envolve criar tags/etiquetas para saltos condicionais e gerar o código para os blocos correspondentes.
- **For**: Este nó é responsável pelos ciclos for, para tal criamos uma label/tag para o início e o fim do ciclo, de seguida o contador é inicializado e verifica-se a condição de paragem. No caso da condição de paragem temos duas opções, quando temos **to** ou **downto**. Para o token **to**, verificamos se *i* ainda é inferior ao final (**SUP**), se for incrementa-mos o contador *i* e entramos no corpo do loop. Para o token **downto**, fazemos a verificação inversa (*i* >= final com a instrução **INF**) e decrementa-mos o contador enquanto a condição for verdadeira.
- **Array**: Este nó representa a declaração e manipulação de arrays. O construtor recebe o nome do array, o tipo base, o intervalo e o tamanho. A geração de código envolve alocar memória na heap para o array (Através de **ALLOCN**) e gerar instruções para acesso e modificação dos elementos, para realizar esta tarefa é colocado o endereço do array no topo da stack com **PUSHG** e acedido ao seu valor no índice através de **LOADN**. Este nodo também é utilizado para aceder elementos individuais de uma string gerando o código máquina correspondente para obter o código ASCII do carácter especificado (através do comando **CHARAT**).

- **Identifier**: Este nó representa variáveis e identificadores. O construtor recebe o nome da variável e o tipo. Durante a geração de código, este nó é usado para carregar valores na stack da máquina virtual, realizando o comando **PUSHG** sobre o índice da variável obtido da tabela de símbolos.
- **FunctionCall**: Este nó representa chamadas a funções, como `writeln` e `readln`. O construtor recebe o nome da função e os argumentos. A geração de código envolve empilhar os argumentos e chamar a função correspondente. Para as funções `writeln` e `write` se estas possuírem mais que um argumento a string que vai ser escrita é primeiro concatenada e só depois é chamado o comando `WRITES` ao invés de cada argumento ser escrito de uma só vez.
- **Literal**: Este nó representa literais (números, strings, booleanos). O construtor recebe o valor literal e o tipo. Durante a geração de código, este nó é usado para empilhar o valor literal na stack da máquina virtual.
- **Assignment**: Este nó representa atribuições de valores a variáveis. O construtor recebe o identificador da variável e a expressão a ser atribuída. A geração de código envolve armazenar o valor na posição correspondente da variável na stack, utilizando o comando **STOREG**.
- **While**: Este nó representa ciclos while. O construtor recebe a condição e o bloco de comandos a ser executado enquanto a condição for verdadeira. A geração de código envolve criar tags/etiquetas para saltos condicionais e gerar o código para o corpo do ciclo.
- **Program**: Este é o nó raiz da AST criada. O construtor recebe o nome do programa, as declarações de variáveis e o bloco de comandos. Durante a geração de código, este nó é responsável por inicializar a stack e devolver o código gerado para o output do programa.

## Otimizações

---

Para otimizar as operações binárias decidimos, no caso de haver apenas literais de ambos os lados da operação, essas operações são realizadas no próprio compilador e apenas o seu resultado é inserido no código-máquina. Mas como podem haver várias operações binárias (Ex:  $5 + 5 + 5$ ), introduzimos um campo de `value` nos nós de **BinaryOp** e **Identifier** e ao gerar o código é verificado se o lado esquerdo e direito têm o campo `value` não vazio para realizar a operação no compilador.

Para além disso, o nosso programa consegue eliminar operações redundantes, como por exemplo  $x + 0$  ou  $x * 1$  apenas gerando o valor de  $x$  para o código-máquina.

Outra otimização que realizamos são para as variáveis. O nosso programa, no caso de variáveis não utilizadas, estas nem são declaradas para não ocupar espaço desnecessário na memória.

## Testes e Validação

---

O compilador foi testado com diversos programas Pascal, para além dos exemplos incluídos no enunciado, para verificar a sua correcta funcionalidade.

### Teste 1: Operações condicionais em ninho

Para este primeiro teste, testamos como o nosso programa lida com condicionais em ninho ([t1.pas](#)).



Como é possível observar pelo output em [t1.vm](#), o compilador reconhece as várias condicionais e consegue distingui-las e o resultado está de acordo com o esperado.

Input: [t1.pas](#) | Output: [t1.vm](#)

## Teste 2: Verificação de operações inválidas

Neste segundo teste verificamos qual seria o output no terminal para uma operação inválida tal como somar um inteiro a uma string. O output é o seguinte:

```
result := a + b; { Invalid: cannot add integer and string }  
Could not compile program.
```

O compilador encontra o erro e informa o utilizador pelo terminal identificando a operação incorreta e a linha onde o erro ocorre.

Input: [t2.pas](#)

## Teste 3: Operações binárias entre literais

No terceiro teste, validamos as otimizações realizadas sobre as operações binárias, realizando-as entre literais para confirmar que apenas o resultado dessas operações é gerado no código-máquina. Para além disso, colocamos uma operação redundante para validar a sua eliminação.

Input: [t3.pas](#) | Output: [t3.vm](#)

## Teste 4: Operações aritméticas redundantes

Para testar uma das otimizações implementadas, a eliminação de operações, redundantes testamos os casos onde temos uma variável a somar com 0, ou multiplicações com 0 e com 1.

Para o teste encontrado no ficheiro de input podemos observar que o output encontrado no ficheiro de output o código máquina gerado não executa nenhuma operação ADD ou MUL pois consegue por defeito saber qual o valor que deve fazer push na stack.

Input: [t4.pas](#) | Output: [t4.vm](#)

## Teste 5: Comparações entre literais

Decidimos testar se as comparações entre literais estavam a ser feitas corretamente pois, tal como as restantes operações binárias, estas também são realizadas no próprio compilador e apenas o seu resultado é escrito no código para a VM.

Input: [t5.pas](#) | Output: [t5.vm](#)

## Teste 6: Verificação de variáveis não utilizadas

Realizamos um teste para verificar como o programa trata de variáveis não declaradas como é possível ver em [t6.pas](#), o programa inicializa as variáveis 'a', 'b', 'c', 'd' e 'e' mas só utiliza 'a', 'b' e 'c', podemos verificar no

terminal o seguinte output

```
Variable 'd' declared but never used.  
Variable 'e' declared but never used.  
Code compiled in: ../out/t6.vm
```

Podemos verificar que o programa informa o utilizador das variáveis no entanto compila na mesma tendo em conta que o programa não aparente mais nenhum erro grave de lógica ou sintaxe. Além deste pormenor podemos verificar em [t6.vm](#) que o programa não alocou memória na stack para as variáveis não aplicadas.

Input: [t6.pas](#) | Output: [t6.vm](#)

## Conclusões

---

O compilador Pascal implementado demonstra os conceitos fundamentais de compiladores, desde a análise léxica até à geração de código. Os principais desafios e aprendizagens incluíram:

Desafios Enfrentados:

- Tratamento de arrays: Mapeamento entre índices Pascal e endereços na máquina virtual
- Conversão de tipos: Implementação segura de conversões automáticas
- Geração de código para a VM: Compreensão da arquitectura baseada em stack

Melhorias Futuras:

- Suporte a procedimentos e funções definidas pelo utilizador
- Implementação de optimizações de código
- Expansão dos tipos suportados: records, enumerações, etc.
- Mensagens de erro mais detalhadas e amigáveis
- Implementação de mais funções intrínsecas do Pascal

**Considerações Finais:** O compilador cumpre o seu objectivo de traduzir programas Pascal para o código da máquina virtual alvo, demonstrando os princípios fundamentais de compiladores. A implementação modular permite fácil manutenção e extensão para incluir mais recursos da linguagem Pascal no futuro.