E-fólio B | Folha de resolução para E-fólio

UNIDADE CURRICULAR: Compilação

CÓDIGO: 21018

DOCENTE: Constantino Martins

TUTOR: Rúdi Gualter

Trabalho realizado pelos alunos (grupo: QUALQUER TOKEN):

Nome: Andreia Romão – **Nº Estudante:** 1702430

Nome: Cátia Santos – **Nº Estudante:** 1702194

Nome: Rui Menino – **Nº Estudante:** 1103425

Nome: Luís Tavares – **Nº Estudante:** 1803237

Nome: José Augusto Azevedo – **Nº Estudante:** 2200655

CURSO: Licenciatura em Engenharia Informática

DATA DE ENTREGA: 19 de Maio de 2025

TRABALHO / RESOLUÇÃO:

O presente relatório documenta o progresso e a implementação relativos ao desenvolvimento de um compilador para a linguagem MOC. Previamente, ambos os grupos Qualquer e Token no E-fólio A da UC de Compilação tinham efetuado a implementação da linguagem MOC, através da construção de uma gramática formal MOC.g4 utilizada pelo analisador sintático (parser) e léxico (lexer). Tendo também sido desenvolvidos componentes de apoio, como um listener customizado de formar a ajudar a validar a estrutura de um programa utilizando ANTRL4.

Nesta nova fase, correspondente ao E-fólio B, o grupo Qualquer e o grupo Token, decidiram juntar-se para continuar a expandir este mesmo compilador. Como tal, foi iniciado um processo de análise e avaliação de ambos os trabalhos desenvolvidos que tinha como objetivo com a identificação do candidato mais indicado, que iria servir de base para as fases subsequentes e mais complexas da implementação do compilador.

Após ponderação conjunta das soluções de análise léxica e sintática apresentadas por cada grupo, foi tomada a decisão de prosseguir o desenvolvimento utilizando como ponto de partida o projeto previamente elaborado pelo "Grupo Qualquer". Esta escolha estratégica visou capitalizar sobre a abordagem considerada mais avançada para facilitar a implementação das fases seguintes. Deste modo, o trabalho descrito no presente documento detalha a continuação da implementação do compilador MOC, utilizando Python, focando-se agora em quatro componentes cruciais do compilador: a análise semântica, a geração de código intermédio, a gestão da tabela de símbolos e a otimização de código intermédio.

O desenvolvimento foi modularizado em ficheiros distintos (VisitorSemantico.py, VisitorTAC.py, TabelaSimbolos.py e OtimizadorTAC.py), cujas implementações e funcionalidades são descritas nas secções seguintes. O objetivo final desta fase foi transformar a representação sintática de um programa MOC válido num código intermédio otimizado, preparando o caminho para a geração de código final.

1. Análise Semântica (VisitorSemantico.py)

A análise semântica é a etapa após a validação sintática, sendo responsável por verificar a coerência lógica e o significado correto do programa, indo além da verificação de estrutura gramatical. O objetivo principal deste visitor é percorrer a árvore de análise sintática (Parse Tree) produzida pelo parser e aplicar regras de consistência que vão além da estrutura gramatical, identificando erros semânticos comuns. Para tal, o visitor mantém um estado interno durante a análise, nomeadamente uma pilha de contextos léxicos, para a gestão de contextos(scopes) de forma a validar situações tais como, a declaração e uso correto dos identificadores (variáveis e funções) e compatibilidade de tipos.

A gestão de contextos léxicos é realizada através de uma lista (*self.* contexto) que funciona como uma pilha, onde cada elemento da lista representa um contexto local – um conjunto (*set*) que

contém os nomes dos identificadores declarados nesse contexto específico. Um novo contexto é empilhado (*append*) ao iniciar a definição de uma função (*visitFuncao*, *visitFuncaoPrincipal*), e os nomes dos parâmetros são imediatamente adicionados a esse novo contexto. Durante a visita a declarações de variáveis locais (*visitDeclaracao*), é verificado se o nome já existe no contexto atual (topo da pilha, *self.contexto[-1])* para detetar duplicações. Não existindo conflito, o novo identificador é inserido nesse contexto. Para finalizar, a análise da função, o contexto correspondente é removido da pilha (*pop*), assegurando a correta delimitação dos contextos léxicos e a integridade da nossa análise semântica.

As principais verificações semânticas implementadas focam-se na garantia de que todos os identificadores são declarados antes de utilizados. Sempre que um identificador é encontrado em diferentes contextos de uso – como no lado esquerdo de uma atribuição (*visitInstrucaoAtribuicao*), num acesso a vetor (*visitAcessoVetor*), como argumento de escrita (*visitInstrucaoEscrita*), ou expressões genéricas (*visitIdComPrefixo*) – o visitor percorre a pilha de contextos pela ordem reversa (*reversed(self.contexto*)) de forma a garantir que esse identificador foi previamente declarado num contexto acessível (o atual ou um superior). Se um identificador não for encontrado, uma exceção de erro semântico é levantada. Adicionalmente, mantém um conjunto (*self.funcoes_declaradas*) que contém os nomes das funções declaradas através de protótipos (*visitPrototipo*, *visitPrototipoPrincipal*), permitindo distinguir entre uma variável não declarada e uma chamada a uma função (*visitIdComPrefixo)* (embora não valide os argumentos das chamadas nesta fase).

Para além destas verificações explícitas, sobre declarações e uso de identificadores, o nosso *VisitorSemantico* percorre recursivamente todas as estruturas da linguagem (expressões, blocos de código, instruções de controlo *if/else*, *while*, *for*, *return*, entre outras), garantindo que as validações semânticas fundamentais são aplicadas em todos os contextos apropriados. As ações semânticas implementadas são:

Verificação de declarações, garante que identificadores e variáveis foram declarados antes do uso e impede a sua redeclaração no mesmo contexto. Para funções e protótipos, valida a consistência dos tipos de retorno e da lista de parâmetros no momento da sua definição; (Figura 1 e Figura 2).

Gestão de contextos, Salvaguarda que cada bloco de código, função ou estrutura de controlo inicia e termina corretamente um novo contexto através de uma pilha de contextos na tabela de símbolos. Assegurando assim, que declarações feitas num determinado contexto não interferem em outros, garantindo isolamento semântico. (Figura 3)

Verificação de tipos, nas instruções de atribuição é verificada a compatibilidade entre o tipo da variável e o valor que está a ser atribuído, no caso das expressões os operandos são analisados conforme o operador em questão (aritméticas, relacionais ou lógico). Finalmente, nas funções é verificado se o tipo de *return* corresponde ao tipo que foi declarado. (Figura 4)

Tratamento de estruturas de controle; nas estruturas condicionais (*if, if/else*) é verificado se a condição é booleana; nos ciclos (*while, for)* são analisadas as expressões de término e inicialização.

Arrays, nas declarações de vetores, validamos as dimensões e o número de elementos fornecidos na lista de inicialização, adicionalmente, no acesso a índices, impedimos o uso de [] em variáveis não declaradas como vetores, prevenindo acessos inválidos.

Funções, nas chamadas de funções, é verificada a existência e paridade dos parâmetros; nos protótipos e definições é garantida a consistência entre declarações e implementações, nomeadamente no tipo de retorno e na lista de tipos dos parâmetros, detetando redefinições inválidas ou incompatibilidades entre protótipo e definição.

Em geral, tivemos como objetivo implementar uma análise semântica robusta, onde analisamos as declarações (variáveis, funções, vetores); os tipos (atribuições, expressões, retornos), os contextos (hierarquia de blocos) e o fluxo de controle (ciclos e condicionais). Nos anexos são apresentados os testes efetuados na deteção de erros semânticos assim como uma lista dos erros semânticos detetados pelo compilador.

2. Geração de Código Intermédio (VisitorTAC.py)

Após a validação semântica do programa MOC, a fase seguinte consiste na tradução da árvore sintática (agora semanticamente correta) para uma representação intermédia mais próxima da máquina, mas ainda independente da arquitetura final.

Foi implementado um outro Visitor (VisitorTAC.py), responsável por percorrer novamente a árvore de análise sintática, utilizando a informação previamente recolhida e validada para gerar a sequência de instruções de código intermédio. A principal responsabilidade deste visitor é traduzir as construções da linguagem MOC para uma representação mais próxima do nível de máquina, mas ainda independente da arquitetura final, é utilizado o código de três endereços (Three-Address Code - TAC), especificamente num formato de quádruplas para a representação intermédia da linguagem.

As instruções são geradas num formato de quádruplas (*operador, argumento1, argumento2, resultado*) e armazenadas internamente numa lista (*tac_quadruplos*). Cada quádrupla é representada como um dicionário com as chaves "*op*", "*arg1*", "*arg2*", e "*res*". Adicionalmente, a classe utiliza também contadores para gerar nomes únicos para variáveis temporárias (*novo_temp*) e rótulos (*nova_label*), essenciais para representar resultados intermédios de expressões e fluxos de controlo. Existem também, um método auxiliar *adicionar_quadruplo* facilita a criação destas quádruplas, abstraindo a geração de registos temporários e organização dos operandos. O acesso a informações semânticas, como variáveis ou funções declaradas, é feito através de estruturas mantidas ou herdadas pelo próprio visitor.

A tradução das construções da linguagem MOC para TAC é realizada através da sobrescrita dos métodos *visitNomeDaRegra*. As expressões aritméticas, lógicas e relacionais são decompostas

em quádruplas elementares, recorrendo a variáveis temporárias para armazenar os resultados intermédios. As atribuições simples são convertidas em instruções do tipo *assign* = ou no caso de vetores, em *[]=* (com cálculo explícito de offset). Estruturas de controlo como *if-else*, *while* e *for* são traduzidas utilizando rótulos (*label*) e instruções de salto condicional (*ifFalse*) ou incondicionais (*goto*). Chamadas a funções são tratadas como instruções *param* para os argumentos e *call* para a invocação, enquanto as funções de entrada/saída (*read, write, etc*.) são mapeadas diretamente para quádruplas específicas. É utilizada uma função utilitária, *gerar_texto_tac*, para converter e formatar a lista de quádruplas numa representação textual legível do nosso código intermédio. No final do processo de visita, a lista *tac_quadruplos* contém a representação TAC completa do programa MOC, pronta para a fase de otimização.

3. Otimização do Código Intermédio (OtimizadorTAC.py)

Com o código intermédio (TAC) gerado, foi desenvolvido um módulo de otimização (*OtimizadorTAC.py)* com o objetivo de aplicar melhorarias sobre a sequência de quádruplas produzidas, antes da geração final, sem alterar a semântica do programa. O otimizador recebe a lista de quádruplas gerada na fase anterior e aplica um conjunto de transformações que visam tornar o código potencialmente mais rápido e/ou mais curto, aumentando a sua eficiência, preparando-o para a etapa de geração de código final.

Ao ser instanciada, a classe *OtimizadorTAC* cria uma cópia profunda (*copy.deepcopy*) da lista de quádruplas recebida, garantindo assim que as otimizações não modificam o código original. Também é possível definir um conjunto opcional *variaveis_utilizador*, que especifica variáveis cujo valor deve ser preservado mesmo que a análise indique que não são usadas posteriormente (útil para resultados finais ou variáveis com significado externo). Esta classe implementa múltiplos métodos, cada um correspondendo a uma técnica de otimização distinta, que descrevemos abaixo com mais detalhe:

- **Eliminação de Código Morto** (*eliminar_codigo_morto*): Esta técnica utiliza uma análise de vivacidade (liveness analysis) percorrendo os quádruplos de trás para a frente com objetivo de identificar as variáveis cujo valor é efetivamente utilizado mais tarde ("*variáveis vivas*"). Instruções cujo resultado (variável de destino *res*) não pertence a esse conjunto de “variáveis vivas” no ponto seguinte e que não possuem efeitos colaterais observáveis (como chamadas a funções, operações de I/O, ou manipulação de memória/arrays) são consideradas “código morto” e consequentemente eliminadas. Instruções sem resultado (labels, gotos) ou com efeitos colaterais são preservadas.
- **Propagação de Cópias** (*propagacao_copias*): São analisadas as instruções de atribuição simples (ex: *t2 = t1*). Se uma variável (*t2*) recebe o valor de outra (*t1*) e essa variável de destino (*t2*) não é redefinida posteriormente de forma complexa (ex: dentro de ciclos ou múltiplas vezes), o otimizador substitui as utilizações subsequentes de *t2* diretamente por *t1*, eliminando a cópia redundante.

- **Dobramento de Constantes** (*constant_folding*): Consiste em procurar por operações aritméticas cujos operandos são ambos constantes numéricas conhecidas em tempo de compilação (ex: *t1 = 3 + 5*). Essas operações são avaliadas e substituídas por uma atribuição direta do resultado calculado (ex: *t1 = 8*), sendo um processo iterativo visto que uma substituição poder propagar novas constantes para as instruções seguintes e necessitar de dobramentos adicionais.
- **Eliminação de Subexpressões Comuns** (*eliminar_subexpressoes_comuns_CSE*): Mantém um registo das expressões já calculadas e das versões atuais das variáveis. Caso encontre uma expressão (*ex: a + b*) que já tenha sido calculada anteriormente com os mesmos operandos (com os mesmos valores e versões), em vez de gerar o código para recalcular, reutiliza o resultado anterior (guardado num temporário), substituindo a computação redundante por uma cópia. Incluímos também uma normalização para operações comutativas, ou seja, *a+b* é tratado como equivalente a *b+a.*
- **Eliminação de Código Inatingível** (*eliminar_codigo_inatingivel*): Remove sequências de instruções que nunca podem ser executadas, normalmente por seguirem imediatamente uma instrução de salto incondicional (*goto*) ou um *return*, e não serem alvo de nenhuma *label*. De forma a alcançar esta otimização é criado um CFG (grafo de fluxo de controlo) após identificarmos as instruções “líderes” no TAC, são criados os blocos básicos associados e por fim efetuada a análise de alcançabilidade dos blocos de código. Isto permite detetar blocos inatingíveis e assim remover os mesmos do código intermédio.
- **Movimento de Código Invariante de Ciclos** (*mover_invariantes*) (**Loop-Invariant Code Motion – LICM)**: Identificamos ciclo (através de saltos para trás - back-edges). Dentro de cada ciclo, procuramos por instruções cujos operandos são definidos fora do ciclo (ou que são valores constantes). Estas instruções "invariantes" são movidas para imediatamente antes do ponto de entrada do ciclo, evitando que sejam recalculadas desnecessariamente a cada iteração.

De forma a orquestrar a aplicação destas técnicas, é implementada a função *otimizar_completo*. Esta função instância o *OtimizadorTAC* e aplica as otimizações numa ordem específica, incluindo a execução repetida da eliminação de código morto até um ponto fixo, ou seja, até que nenhuma alteração adicional seja possível, dado que outras otimizações podem gerar novo código redundante. O resultado final desta função é a lista de quádruplas TAC otimizada, pronta para a geração de código final.

Concluindo, o nosso compilador da linguagem MOC evoluiu, desde compreender as palavras e estruturas do código (análise lexical e sintática), passando pela verificação de coerência lógica (análise semântica), até á geração de uma versão intermédia mais simples e próxima da máquina: o código intermédio (TAC). Ao mesmo, foram aplicadas várias técnicas de otimização, de forma a garantir o aproveitamento de constantes, eliminação de código inatingível e redução de cálculos

redundantes, permitindo um código intermédio mais limpo e eficiente, e que pronto para as seguintes fases da compilação.

Nos anexos apresentamos inúmeros testes efetuados ao longo do desenvolvimento de cada uma das etapas.

ANEXOS

Lista das Especificações da Linguagem MOC

1. **Comentários -** Delimitadores: /* (início) e */ (fim).
2. **Estrutura do Programa**
   - 2.1. **Protótipos de funções**: Devem ser declarados antes de qualquer função ou variável.
   - 2.2. **Função main()**: Ponto de entrada obrigatório.
3. **Blocos de Código -** Delimitados por {}, mesmo para blocos com uma única instrução
4. **Instruções e Operadores**
   - 4.1. **Terminação**: Todas as instruções terminam com ;.
   - 4.2. **Operadores**:
     - 4.2.1. Aritméticos: +, -, *, /, %.
     - 4.2.2. Relacionais: ==, !=, >, <, >=, <=.
     - 4.2.3. Lógicos: && (E), || (OU), ! (NÃO).
     - 4.2.4. Atribuição: =.
   - 4.3. **Condições**: Formato restrito a Expr ou Expr OpCond Expr (e.g., x > 5 && y != 0).
5. **Estruturas de Controle**
   - 5.1. **Condicionais**:
     - 5.1.1. if (condicao){…} ou if(condicao){…}else{…}
     - 5.1.2. switch/case.
   - 5.2. **Loops**:
     - 5.2.1. for
     - 5.2.2. while.
6. **Declaração de Funções**
   - 6.1. Formato: tipo_retorno nome(parâmetros) { ... }.
   - 6.2. Tipos de retorno: int, double, void, ou ausente (void implícito).
7. **Tipos de Dados**
   - 7.1. **Básicos**: int (inteiros), double (ponto flutuante).
   - 7.2. **Vetores**: Arrays de int ou double (e.g., int v[] = {1, 2, 3};).
   - 7.3. **Strings**: Vetores de int terminados em 0 (ASCII).
8. **Variáveis**
   - 8.1. **Declaração**:
     - 8.1.1. Sem inicialização: Valor padrão 0.
     - 8.1.2. Com inicialização: Usando expressões aritméticas (e.g., int c = 2 * b;).
     - 8.1.3. Vetores: Tamanho automático se inicializados (e.g., int v[] = {1, 2};).
   - 8.2. **Âmbito**: Variáveis devem ser declaradas antes do uso.
9. **Entrada/Saída**
   - 9.1. **Entrada**:
     - 9.1.1. read(): Lê int ou double.
     - 9.1.2. readc(): Lê caracter (retorna valor ASCII).
     - 9.1.3. reads(): Lê string para vetor de int (termina em 0).
   - 9.2. **Saída**:
     - 9.2.1. write(x): Imprime valor de variável.
     - 9.2.2. writec(x): Imprime caracter (ASCII).
     - 9.2.3. writev(vetor): Imprime vetor no formato {1, 2, 0}.
     - 9.2.4. writes("texto"): Imprime string (com \n ao final).
10. **Conversão de Tipos**
    - 10.1. **Implícita**: int → double em operações mistas.
    - 10.2. **Explícita**: Usar (int) ou (double) (e.g., (int) 3.14 → 3).
11. **Regras Adicionais**
    - 11.1. **Strings Literais**: Usadas diretamente no writes("Olá").
    - 11.2. **Vetores como Strings**: int s[] = reads(); armazena códigos ASCII + 0.
    - 11.3. **Erros**: Uso de variáveis não declaradas é inválido.

Exemplo, testes efetuados e análise

```
        void main(void);
        void main(void) {
            int x;
            a = x +1;
            int x;
        }

--- Análise sintática concluída ---
DEBUG: Entrou num novo contexto. Nível atual: 2
[Erro semântico] Variável 'a' não declarada
[Erro semântico] Variável 'x' já declarada neste contexto

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.
```

Figura 1 - Verificação de declarações - variáveis

```
        int soma(double);
        void main(void);
        double soma(int a){
            soma = a + 10 ;
        }
        void main(void) {
            int x;
            a = x +1;
        }

--- Análise sintática concluída ---
DEBUG: Entrou num novo contexto. Nível atual: 2
[Erro semântico] Tipo de retorno incompatível para 'soma' (esperado: int, obtido: double)
```

Figura 2 - Verificação de declarações - Funções/Protótipos

```
def entrar_contexto(self):
    """Adiciona um novo contexto (nível) à pilha."""
    self.pilha_contextos.append({})
    debug_print(f"Entrou num novo contexto. Nível atual: {len(self.pilha_contextos)}")
```

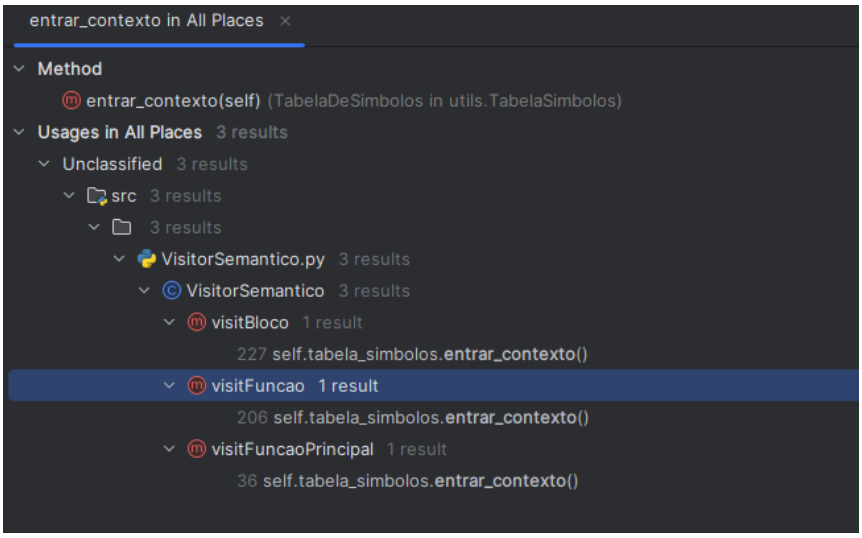


Figura 3 - Criação de contextos no início de função, início do main e início de bloco

```
void main(void);

void main(void) {
    double b = 2;     // OK: int para double é conversão segura
    int c;
    c = 4.5;          // ERRO: double para int
}
```

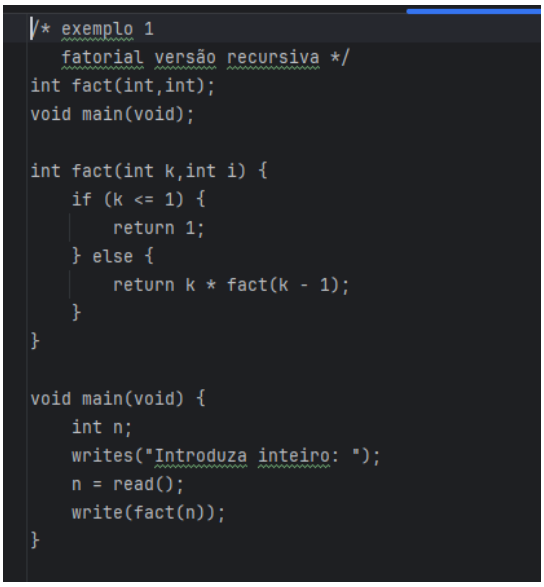
```
--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
[Erro semântico] Atribuição de tipo incompatível em 'c' (esperado: int, obtido: double)

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.

Process finished with exit code 1
```

Figura 4 - Input e Output de Verificação de compatibilidade de tipos

```
Launching pytest with arguments D:\UAB\Compilacao\GitHub\21018_Compilacao\Team_QualquerToken\Estrutura_proposta\compilador_moc

============================= test session starts =============================
collecting ... collected 14 items

Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_acesso_variavel_fora_contexto PASSED [  7%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_atribuicao_valida PASSED [ 14%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_codigo_sem_erros_semanticos_esperados PASSED [ 21%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_contexto_local_valido PASSED [ 28%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_declaracao_simples_valida PASSED [ 35%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_declaracao_duplicada_mesmo_contexto PASSED [ 42%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_funcao_nao_declarada_chamada PASSED [ 50%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_if_condicao_nao_declarada PASSED [ 57%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_loop_for_variavel_controle_nao_declarada PASSED [ 64%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_loop_while_condicao_nao_declarada PASSED [ 71%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_variavel_nao_declarada_atribuicao PASSED [ 78%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_variavel_nao_declarada_expressao PASSED [ 85%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_erro_vetor_nao_declarado_acesso PASSED [ 92%]
Testes_semanticos.py::TestVisitorSemantico::test_uso_parametro_valido PASSED [100%]

============================== 14 passed in 0.15s ==============================

Process finished with exit code 0
```

Figura 5 - Verificação da deteção dos erros semânticos

Input:



```
/* exemplo 1
   fatorial versão recursiva */
int fact(int,int);
void main(void);

int fact(int k,int i) {
    if (k <= 1) {
        return 1;
    } else {
        return k * fact(k - 1);
    }
}

void main(void) {
    int n;
    writes("Introduza inteiro: ");
    n = read();
    write(fact(n));
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo1.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
fact:
k = param1
i = param2
t1 = k <= 1
ifFalse t1 goto L2
L1:
return 1
goto L3
L2:
t2 = k - 1
param t2
t3 = call fact
t4 = k * t3
return t4
L3:
end_fact:
main:
writes "Introduza inteiro: "
t5 = call read
n = t5
param n
t6 = call fact
write t6
halt
```

```
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
fact:
t1 = param1 <= 1
ifFalse t1 goto L2
L2:
t2 = param1 - 1
param t2
t3 = call fact
t4 = param1 * t3
return t4

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* exemplo 2 */
int fact(int);
void main(void);
int f=5;
int fact(int k) {
    int i, n = 1;
    for (i = 2; i <= k; i = i + 1) {
        n = n * i;
    }
    return n;
}

void main(void) {
    int n;
    writes("Introduza inteiro: ");
    n = read();
    write(fact(n));
}
```

Output:

```
python.exe  main.py  .\test_examples\exemplo2.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---
```

```
==== CÓDIGO TAC GERADO ====
f = 5
fact:
k = param1
n = 1
i = 2
L1:
t1 = i <= k
ifFalse t1 goto L3
L2:
t2 = n * i
n = t2
t3 = i + 1
i = t3
goto L1
L3:
return n
end_fact:
main:
writes "Introduza inteiro: "
t4 = call read
n = t4
param n
t5 = call fact
write t5
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
fact:
n = 1
i = 2
n = 2
i = 3
L1:
t1 = i <= param1
ifFalse t1 goto L3
L3:
return n

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* exemplo 3
média de uma lista de valores positivos */
double avg(int);
void main(void);

double avg(int size) {
    int i;
    double sum = 0;
    for (i = 0; i < size; i = i + 1) {
        sum = sum + i;
    }
    return sum / size;
}

void main(void) {
    int i, n;
    double v[100];
    writes("Introduza tamanho do vetor, seguido dos respetivos valores: ");
    n = read();
    for (i = 0; i < n; i = i + 1) {
        v[i] = read();
    }
    write(avg(v, n));
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo3.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
avg:
size = param1
sum = 0
i = 0
L1:
t1 = i < size
ifFalse t1 goto L3
L2:
t2 = sum + i
sum = t2
t3 = i + 1
i = t3
goto L1
L3:
t4 = sum / size
return t4
end_avg:
main:
alloc v, 100
writes "Introduza tamanho do vetor, seguido dos respetivos valores: "
t5 = call read
n = t5
i = 0
L4:
t6 = i < n
ifFalse t6 goto L6
L5:
t7 = i * 4
t8 = call read
v[t7] = t8
t9 = i + 1
i = t9
goto L4
L6:
param v
param n
t10 = call avg
write t10
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
avg:
```

```
sum = 0
i = 0
i = 1
L1:
t1 = i < param1
ifFalse t1 goto L3
L3:
t4 = sum / param1
return t4

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
void main(void);
void main(void) {
    int x;
    x = 10;
    write(x);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo4.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 10
write x
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
write 10
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
void main(void);
void main(void) {
    int x;
    x = 10;
    int y=x;  /* isto deve desaparecer */
    if (x == 10) {
        writes("10");
    } else {
     /* isto deve desaparecer  */
        x = x + 25;
    }
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo5.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 10
y = x
t1 = x == 10
ifFalse t1 goto L2
L1:
writes "10"
goto L3
L2:
t2 = x + 25
x = t2
L3:
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
x = 10
L1:
writes "10"
goto L3
L3:
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c;
    a = 10;
    c = b + 10;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo6.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 10
t1 = b + 10
c = t1
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
t1 = b + 10
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
void main(void);

void main(void) {
    int i, n, x, y, z;
    x = 10;
    y = 20;
    n = read();

    for (i = 0; i < n; i = i + 1) {
        z = x + y;
        write(z);
    }
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\exemplo7.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 10
y = 20
t1 = call read
n = t1
i = 0
L1:
t2 = i < n
ifFalse t2 goto L3
L2:
t3 = x + y
z = t3
write z
t4 = i + 1
i = t4
goto L1
L3:
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
t1 = call read
i = 0
i = 1
L1:
t2 = i < t1
ifFalse t2 goto L3
L3:
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
void main(void);
void main(void) {
    int x;
    x = funcaoNaoDeclarada(3); // Erro: função não declarada
}
```

Output:

```
C:\ProgramData\anaconda3\python.exe D:\UAB\Compilacao\GitHub\21018_Compilacao\Team_Qualquer

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
[Erro semântico] Função 'funcaoNaoDeclarada' não declarada

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.

Process finished with exit code 1
```

Input:

```
/* exemplo com múltiplos erros semânticos */
int fact(int);
void main(void);

int fact(int n) {
    int n;                  // [Erro]: variável 'n' já foi declarada
    if (k <= 1) {           // [Erro]: variável 'k' não declarada
        return 1;
    } else {
        return k * fact();  // [Erro]: chamada à função 'fact' com número errado de argumentos
    }
}

void main(void) {
    int n;
    writes("Introduza inteiro: ");
    x = read();             // [Erro]: variável 'x' usada antes de ser declarada
    write(fact(n));
    writev(v);              // [Erro]: vetor 'v' usado antes de ser declarado
}
```

Output:

```
C:\ProgramData\anaconda3\python.exe D:\UAB\Compilacao\GitHub\21018_Compilacao\Team_Qualque

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
[Erro semântico] Variável 'n' já declarada neste contexto
[Erro semântico] Identificador 'k' não declarado (linha 7)
[Erro semântico] Variável 'x' não declarada
[Erro semântico] Vetor 'v' usado antes de ser declarado.

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.

Process finished with exit code 1
```

Input:

```
int main();
int main() {
    int soma = 0;
    int i;
    for (i = 0; i < 10; i+1) {
        if (i == 5) {
            break; // O loop termina AQUI quando i = 5.
            // ---- INÍCIO DO CÓDIGO INATINGÍVEL (nesta iteração) ----
            // Este código só seria alcançável se o break não existisse
            // ou estivesse dentro de outra condição que pudesse ser falsa.
            // Como está logo após um break incondicional DENTRO DO if(i==5),
            // nunca é executado QUANDO i==5.
            write(i);
            // ---- FIM DO CÓDIGO INATINGÍVEL ----
        }
        soma = soma + i;
        write(soma);
    }
    write(soma); // Soma será 0+1+2+3+4 = 10
    return 0;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\teste_ciclo.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
soma = 0
i = 0
L1:
t1 = i < 10
ifFalse t1 goto L3
L2:
t2 = i == 5
ifFalse t2 goto L5
L4:
write i
L5:
```

```
t3 = soma + i
soma = t3
write soma
t4 = i + 1
goto L1
L3:
write soma
return 0
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
soma = 0
t2 = False
t3 = 0
L1:
L2:
ifFalse t2 goto L5
L5:
soma = t3
write soma
goto L1

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* exemplo 1
   fatorial versão recursiva */
int fact(int);
void main(void);

int fact(int n) {
    if (k <= 1) {
        return 1;
    } else {
        return k * fact(k - 1);
    }
}

void main(void) {
    int n;
    writes("Introduza inteiro: ");
    n = read();
    write(fact(n));
}
```

Output:

```
C:\ProgramData\anaconda3\python.exe D:\UAB\Compilacao\GitHub\21018_Compilacao\Team_Qua

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
[Erro semântico] Identificador 'k' não declarado (linha 7)

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.

Process finished with exit code 1
```

Input:

```
void main(void);

void main(void) {
    int x = 2 + 3;            // constante dobrável → x = 5
    int y = x;                // cópia → y = 5
    int z = y;                // cópia → z = 5
    int r = 10 - 4;           // constante dobrável → r = 6
    int t = r;
    int a = 7;
    int b = 3;
    int soma = a + b;         // a + b = 10
    double d = (double) soma; // cast explícito
    int v[3] = {1, 2, 3};     // vetor com valores literais
    int i = 0;
    int total = 0;
    while (i < 3) {
        total = total + v[i]; // uso de vetor
        i = i + 1;
    }
    if (total > 5) {
        write(total);         // total = 6
    } else {
        write(0);
    }
    int copia = total;
    int resultado = copia;
    write(resultado);         // resultado = 6

    // Chamadas que geram TAC mas cujo valor não é usado
    read();
    readc();
    reads();
    // Escrita de literais
    writes("fim");
}
```

Output:

```
python.exe main.py .c\test_examples\teste_geral.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---
```

```
--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
t1 = 2 + 3
x = t1
y = x
z = y
t2 = 10 - 4
r = t2
t = r
a = 7
b = 3
t3 = a + b
soma = t3
t4 = (double) soma
d = t4
alloc v, 3
t5 = 0 * 4
v[t5] = 1
t6 = 1 * 4
v[t6] = 2
t7 = 2 * 4
v[t7] = 3
i = 0
total = 0
L1:
t8 = i < 3
ifFalse t8 goto L3
L2:
t9 = i * 4
t10 = v[t9]
t11 = total + t10
total = t11
t12 = i + 1
i = t12
goto L1
L3:
t13 = total > 5
ifFalse t13 goto L5
L4:
write total
goto L6
L5:
write 0
L6:
copia = total
resultado = copia
write resultado
t14 = call read
t15 = t14
t16 = call readc
t17 = t16
t18 = call reads
t19 = t18
writes "fim"
halt
```

```
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
t4 = (double) 10
alloc v, 3
v[0] = 1
v[4] = 2
v[8] = 3
total = 0
t9 = 0
L1:
L2:
t10 = v[t9]
t11 = total + t10
total = t11
goto L1

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* exemplo com variável duplicada */
int fact(int);
void main(void);

int fact(int k) {
    if (k <= 1) {
        return 1;
    } else {
        return k * fact(k - 1);
    }
}

void main(void) {
    int n;
    int n;  // <- erro semântico: variável duplicada
    writes("Introduza inteiro: ");
    n = read();
    write(fact(n));
}
```

Output:

```
C:\ProgramData\anaconda3\python.exe D:\UAB\Compilacao\GitHub\21018_Compilacao\Team_QualquerT

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
[Erro semântico] Variável 'n' já declarada neste contexto

Erros semânticos encontrados. A abortar o processo de geração de código intermédio.

Process finished with exit code 1
```

Input:

```
void main(void);

void main(void) {
    double x=5;
    int a = 2.5;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador01.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 5
a = 2.5
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimizacao
    constant_folding - Substitui expressões com constantes
    remove variavel não utilizada
*/
void main(void);
void main(void) {
    int x[]={1,2,3};
    int y= x[0] + x[1];
    write(y);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador02.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
t1 = 0 * 4
x[t1] = 1
t2 = 1 * 4
x[t2] = 2
t3 = 2 * 4
x[t3] = 3
t4 = 0 * 4
t5 = x[t4]
t6 = 1 * 4
t7 = x[t6]
t8 = t5 + t7
y = t8
write y
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
x[0] = 1
x[4] = 2
x[8] = 3
t4 = 0
t5 = x[t4]
t7 = x[4]
t8 = t5 + t7
write t8
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
 /* teste de optimização em operações combinadas doubles */
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c;
    double d;
    a = 5;
    b = 10;
    c = (a + b) * 2;
    d = c / 5.0;
    write(d);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador03.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 5
b = 10
t1 = a + b
t2 = t1 * 2
c = t2
t3 = c / 5.0
d = t3
write d
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
write 6.0
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimização em operações combinadas inteiros */
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c, d, e;
    a = 50;
    b = 10;
    c = a + b;
    d = 3 * b;
    e = c - d;
    write(e);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador04.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 50
b = 10
t1 = a + b
c = t1
t2 = 3 * b
d = t2
t3 = c - d
e = t3
write e
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
write 30
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimização em operações combinadas */
void main(void);
void main(void) {
    int c;
    int a = 5;
    int b = 10;
    c = a + b * 2;
    int d = b + 1;
    write(d);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador05.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 5
b = 10
t1 = b * 2
t2 = a + t1
c = t2
t3 = b + 1
d = t3
write d
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
write 11
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimizacao de constant folding */
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c, d;
    a = 5;
    b = 10;
    c = a + (b * 2.0);
    d = c / 5.0;
    write(d);
    /* arrays */
    int e, f= read(), g=2*b, x[]={1,2,3};
    int y= x[0] + x[1];
    write(y);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador06.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 5
b = 10
t1 = b * 2.0
t2 = a + t1
c = t2
t3 = c / 5.0
d = t3
write d
t4 = call read
f = t4
t5 = 2 * b
g = t5
t6 = 0 * 4
x[t6] = 1
t7 = 1 * 4
x[t7] = 2
t8 = 2 * 4
x[t8] = 3
t9 = 0 * 4
```

```
t10 = x[t9]
t11 = 1 * 4
t12 = x[t11]
t13 = t10 + t12
y = t13
write y
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
write 5.0
t4 = call read
x[0] = 1
x[4] = 2
x[8] = 3
t9 = 0
t10 = x[t9]
t12 = x[4]
t13 = t10 + t12
write t13
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

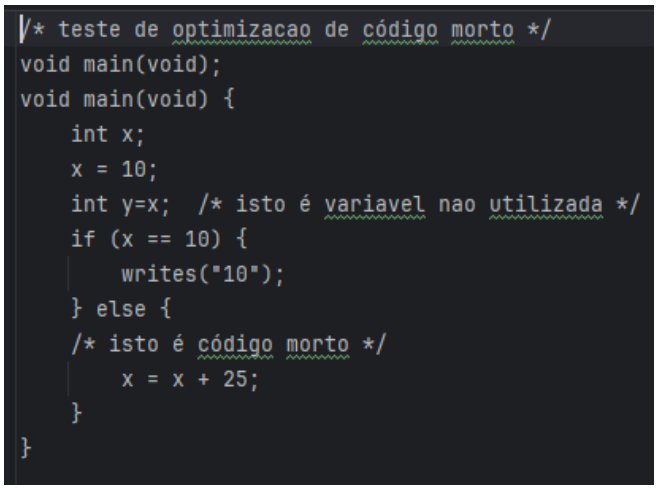
```
 /* teste de optimizacao de código morto */
void main(void);
void main(void) {
    int x;
    x = 15;
    int y=x;  /* isto é variavel nao utilizada */
    if (x == 10) {
        writes("10");
    } else {
    /* isto é código morto */
        x = x + 25;
    }
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador07.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---
```

```
--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 15
y = x
t1 = x == 10
ifFalse t1 goto L2
L1:
writes "10"
goto L3
L2:
t2 = x + 25
x = t2
L3:
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
x = 15
t1 = False
ifFalse t1 goto L2
L2:
x = 40
L3:
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:



```
/* teste de optimizacao de código morto */
void main(void);
void main(void) {
    int x;
    x = 10;
    int y=x;  /* isto é variavel nao utilizada */
    if (x == 10) {
        writes("10");
    } else {
    /* isto é código morto */
        x = x + 25;
    }
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador08.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---
```

```
--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
x = 10
y = x
t1 = x == 10
ifFalse t1 goto L2
L1:
writes "10"
goto L3
L2:
t2 = x + 25
x = t2
L3:
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
x = 10
L1:
writes "10"
goto L3
L3:
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```c
 /* teste de optimizacao de codigo inantigivel */
int obter_valor();
int main();
int obter_valor() {
    int valor = 42;
    return valor; // O controlo sai da função AQUI.

    // ---- INÍCIO DO CÓDIGO INATINGÍVEL ----

    valor = valor + 10; // Esta atribuição nunca acontece.
    write(valor);
    // ---- FIM DO CÓDIGO INATINGÍVEL ----
}

int main() {
    int resultado = obter_valor();
    write(resultado);
    return 0;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador09.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
obter_valor:
valor = 42
return valor
t1 = valor + 10
valor = t1
write valor
end_obter_valor:
main:
t2 = call obter_valor
resultado = t2
write resultado
return 0
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
obter_valor:
valor = 42
return valor

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimizacao de odigo inantigivel */

int main();
int main() {
    int soma = 0;
    int i;
    for (i = 0; i < 10; i+1) {
        if (i == 5) {
            //writes("Encontrado i = 5, a sair do loop...");
            break; // O loop termina AQUI quando i = 5.

            // ---- INÍCIO DO CÓDIGO INATINGÍVEL (nesta iteração) ----
            // Este código só seria alcançável se o break não existisse
            // ou estivesse dentro de outra condição que pudesse ser falsa.
            // Como está logo após um break incondicional DENTRO DO if(i==5),
            // nunca é executado QUANDO i==5.
            write(i);
            // ---- FIM DO CÓDIGO INATINGÍVEL ----
        }
        soma = soma + i;
        write(soma);
    }
    write(soma); // Soma será 0+1+2+3+4 = 10
    return 0;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador10.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
soma = 0
i = 0
L1:
t1 = i < 10
ifFalse t1 goto L3
L2:
t2 = i == 5
ifFalse t2 goto L5
L4:
write i
L5:
t3 = soma + i
soma = t3
write soma
t4 = i + 1
goto L1
L3:
write soma
return 0
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
soma = 0
t2 = False
t3 = 0
L1:
L2:
ifFalse t2 goto L5
L5:
soma = t3
write soma
goto L1

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
 /* teste de optimizacao de propagacao de copia */
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c;
    a = 10;
    c = b + 10;
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador11.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 10
t1 = b + 10
c = t1
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
t1 = b + 10
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Input:

```
/* teste de optimizacao de propagacao de copias com redefinição */
void main(void);
void main(void) {
    int a, b, c;
    a = 100;
    write(a);
    b = a;
    a = 10;
    c = b + 20;
    write(c);
}
```

Output:

```
python.exe main.py .\test_examples\Testes_optimizador12.moc

--- A iniciar Análise Sintática ---

--- Análise Sintática concluída ---

--- A iniciar Análise Semântica ---

--- Análise Semântica concluída ---

--- A iniciar Geração de Código Intermédio ---

--- Geração de Código Intermédio concluída ---

==== CÓDIGO TAC GERADO ====
main:
a = 100
write a
b = a
a = 10
t1 = b + 20
c = t1
write c
halt
end_main:

==== CÓDIGO TAC OTIMIZADO ====
main:
a = 100
write a
a = 10
write 120
halt
end_main:

Process finished with exit code 0
```

Lista de erros semânticos detetados

Para se entender a natureza dos diferentes erros semânticos que podem ocorrer durante a análise temos os seguintes erros detetados:

1. Erros de declaração, redeclaração e definição:

Erros relacionados à forma como variáveis, funções, parâmetros e protótipos são declarados ou definidos, incluindo conflitos de nomes e redefinições.

[Erro semântico] Conflito na declaração de '{nome_funcao}' (já declarado como {simbolo})
[Erro semântico] Erro ao declarar função '{nome_funcao}'
[Erro semântico] Erro ao declarar variável '{nome_var}'
[Erro semântico] Erro inesperado ao declarar função principal '{nome_funcao}'
[Erro semântico] Erro inesperado ao declarar protótipo '{nome_funcao}'
[Erro semântico] Parâmetro '{param.nome}' já foi declarado.
[Erro semântico] Parâmetro '{param['nome']}' redeclarado
[Erro semântico] Protótipo '{nome_funcao}' redeclarado identicamente
[Erro semântico] Redefinição da função principal '{nome_funcao}' (já declarada na linha {nrlinha})
[Erro semântico] Redefinição inválida de '{nome_funcao}' (já declarado como {simbolo})
[Erro semântico] Variável '{nome_var}' já declarada neste contexto

2. Erros de tipo:

Erros que ocorrem quando há incompatibilidade entre os tipos de dados esperados e os tipos de dados fornecidos (em atribuições, inicializações, parâmetros de função, retornos de função).

[Erro semântico] Atribuição incompatível em '{nome_variavel}' (esperado: {simbolo.tipo}, obtido: {tipoexp})
[Erro semântico] Inicialização com tipo incompatível para '{nome}' (esperado: {tipo_var}, obtido: {tipo_expr})
[Erro semântico] Parâmetros incompatíveis para '{nome_funcao}'
[Erro semântico] Tipo de retorno incompatível para '{funcao}' (esperado: {tiporetorno}, obtido: {tiporetorno})

3. Uso de Identificadores não declarados:

Erros que acontecem ao tentar usar uma variável, função ou vetor que não foi previamente declarado no escopo atual.

[Erro semântico] Função '{nome}' não declarada
[Erro semântico] Identificador '{nome}' não declarado (linha {linha})
[Erro semântico] Variável '{nome_variavel}' não declarada"
[Erro semântico] Variável '{nome}' não declarada
[Erro semântico] Vetor '{nome}' usado antes de ser declarado.

4. Uso indevido de identificadores:

Erros relacionados ao uso de um identificador de forma incorreta para o seu tipo (por exemplo, tentar aceder a um índice de algo que não é um vetor).

[Erro semântico] Acesso a índice em não-vetor '{nome}'
[Erro semântico] Índice aplicado a não-vetor '{nome_variavel}'

5. Erros específicos de vetor/array:

Erros que se aplicam exclusivamente à definição ou manipulação de vetores (arrays).

[Erro semântico] Tamanho de array deve ser positivo
[Erro semântico] Tamanho de array inválido

Lista de Estruturas Auxiliares Utilizadas nos Métodos do OtimizadorTAC

Em cada método de otimização do OtimizadorTAC são usadas estruturas auxiliares essências na obtenção dos resultados pretendidos. Essas estruturas são:

1. Constant Folding

Estruturas Auxiliares:

- constantes_resolvidas (Dicionário Dict[str, int|float|bool]):
  - Mapeia **nomes de variáveis/temporários** para seus **valores constantes conhecidos**.
  - Exemplo: Se t1 = 5 + 3 é resolvido para t1 = 8, armazena {"t1": 8}.
- **Função** resolve_operand():
  - Determina se um operando é constante (literal ou variável com valor conhecido).
  - Retorna (valor, é_constante).

Fluxo:

1. Percorre os quadruplos buscando operações com operandos constantes.
2. Usa constantes_resolvidas para substituir variáveis por valores conhecidos.
3. Calcula o resultado da operação em tempo de compilação e atualiza o dicionário.

2. Propagação de Cópias

Estruturas Auxiliares:

- Substituições (Dicionário Dict[str, str]):
  - Mapeia **variáveis destino** para **variáveis origem** em cópias diretas (ex: {"b": "a"} para b = a).
- Atribuições (Dicionário Dict[str, int]):
  - Conta quantas vezes cada variável foi atribuída (ex: {"a": 1, "b": 2}).
- modificadas_em_ciclos (Conjunto Set[str]):
  - Armazena variáveis modificadas em loops/desvios (não seguras para propagação).

Fluxo:

1. Conta atribuições com atribuicoes.
2. Marca variáveis em loops com modificadas_em_ciclos.
3. Substitui usos de variáveis copiadas usando substituições (ex: substitui b por a se b = a).

3. Eliminação de Subexpressões Comuns (CSE)

Estruturas Auxiliares:

- expressoes_vistas (Dicionário Dict[Tuple, str]):
  - Chave: Tupla (operação, arg1, versão_arg1, arg2, versão_arg2) (ex: ("+", "a", 1, "b", 1)).
  - Valor: Nome do temporário que armazenou o resultado (ex: "t1").
- versao_vars (Dicionário Dict[str, int]):
  - Rastreia **versões** de variáveis (incrementadas a cada atribuição).
  - Evita falsos positivos (ex: se a muda, a + b não é mais a mesma subexpressão).

Fluxo:

1. Para cada operação, gera uma chave única baseada nos operandos e suas versões.
2. Se a chave existe em expressoes_vistas, reutiliza o resultado armazenado.
3. Caso contrário, registra a nova expressão no dicionário.

4. Loop-Invariant Code Motion (LICM)

Estruturas Auxiliares:

- label_idx (Dicionário Dict[str, int]):
  - Mapeia **labels** para **índices** no TAC (ex: {"L1": 5}).
- Defs (Conjunto Set[str]):
  - Variáveis modificadas dentro do loop.
- Invariantes (Lista List[Tuple[int, int, Quadrupla]]):
  - Armazena instruções invariantes e suas posições originais.

Fluxo:

1. Identifica loops (saltos para trás) usando label_idx.
2. Coleta variáveis modificadas no loop (defs).
3. Move instruções cujos operandos não estão em defs para fora do loop.

5. Eliminação de Código Morto

Estruturas Auxiliares:

- vivas (Conjunto Set[str]):
  - Variáveis cujos valores são lidos posteriormente.
- usados (Conjunto Set[str]):
  - Variáveis usadas como operandos em qualquer instrução.
- variaveis_utilizador (Conjunto Set[str]):
  - Variáveis explicitamente marcadas como não removíveis (ex: saídas do programa).

Fluxo:

1. Identifica variáveis usadas (usados) em uma primeira passagem.
2. Na segunda passagem (de trás para frente), atualiza vivas com variáveis lidas.
3. Remove instruções cujos resultados não estão em vivas.

6. Eliminação de Código Inatingível

Estruturas Auxiliares:

- lideres (Conjunto Set[int]):
  - Índices de instruções que iniciam blocos básicos (primeira instrução, alvos de saltos, etc.).
- blocos (Lista List[BlocoBasico]):
  - Blocos básicos do CFG, com sucessores e predecessores.

- ids_blocos_alcancaveis (Conjunto Set[int]):
    - Blocos alcançáveis a partir do bloco inicial (via BFS no CFG).

Fluxo:

1. Constrói o CFG com lideres e blocos.
2. Executa BFS para encontrar blocos alcançáveis (ids_blocos_alcancaveis).
3. Remove blocos não alcançáveis e salta para labels inexistentes.

7. Construção do Grafo de Fluxo de Controle (CFG)

Estruturas Auxiliares:

- mapa_labels_para_id_bloco (Dicionário Dict[str, int]):
    - Relaciona **labels** a **IDs de blocos** (ex: {"L1": 0}).
- mapa_idx_lider_para_id_bloco (Dicionário Dict[int, int]):
    - Mapeia **índices de líderes** no TAC para **IDs de blocos**.

Fluxo:

1. Identifica líderes e cria blocos básicos.
2. Conecta blocos via sucessores com base em goto, ifFalse, etc.
3. Usa os mapas para resolver saltos durante otimizações.

Resumo das Estruturas por Método

Método	Estruturas Auxiliares	Finalidade
Constant Folding	constantes_resolvidas, resolve_operand	Avaliar expressões constantes e substituir por resultados.
Propagação de Cópias	substituicoes, atribuicoes, modificadas_em_ciclos	Eliminar atribuições redundantes (x = y → substituir x por y).
CSE	expressoes_vistas, versao_vars	Evitar recálculo de expressões idênticas.
LICM	label_idx, defs, invariantes	Mover código invariante para fora de loops.
Código Morto	vivas, usados, variaveis_utilizador	Remover instruções com resultados não utilizados.
Código Inatingível	lideres, blocos, ids_blocos_alcancaveis	Eliminar blocos nunca executados.
CFG	mapa_labels_para_id_bloco, mapa_idx_lider_para_id_bloco	Modelar fluxo do programa para análises.

Estas estruturas garantem que as otimizações são **precisas** e **eficientes**, evitando efeitos colaterais indesejados.

Bibliografia/Referências:

- Compilers: principles, techniques and tools, 2nd Ed., Aho, Lam, Setti, Ullman, Addison-Wesley, 2007
- Compiladores – Da Teoria à Prática, Pedro Reis Santos e Thibault Langlois. FCA, 2015.
- The ANTLR Mega Tutorial: https://tomassetti.me/antlr-mega-tutorial/
- ANTLR Doc: https://github.com/antlr/antlr4/blob/master/doc/index.md
- CD | INTRODUCTION | INTRODUCTION AND VARIOUS PHASES OF COMPILER | RAVINDRABABU RAVULA
  https://youtu.be/Qkwj65l_96I?list=PL5UbMb0H_A9hs6Z_myVW_tqRpFipkzniD
- EECS4302 ANTLR4 PARSER GENERATOR TUTORIAL
  https://youtu.be/-FdD_xzNFL4?list=PL5UbMb0H_A9hs6Z_myVW_tqRpFipkzniD
- COMPILADORES DE JUDSON SANTIAGO
  https://www.youtube.com/playlist?list=PLX6Nyaq0ebfhI396WlWN6WlBm-tp7vDtV
- COMPILADORES DE PROF. JOSÉ RUI
  https://www.youtube.com/playlist?list=PLqlIQgAFrQ14VmHe8VbIVUkBv5Hziv86-
- COMPILADORES (CC3001) — 2022/2023 — Professor Pedro Vasconcelos, 2022. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
  https://www.dcc.fc.up.pt/~pbv/aulas/compiladores/teoricas/